

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR
GEOFIZIKUSOK
EGYESÜLETÉNEK
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE
ASSOCIATION
OF HUNGARIAN
GEOPHYSICISTS

Köszönet Petró Erzsinek

Professzor Dr. Dobróka Mihály „A Miskolci Egyetem Iskolateremtő Professzora”
elismerést kapta egyetemétől

A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2026. évi Közgyűlése
Ifjú Szakemberek Ankétja – Szarvas, 2026. március 27–28.
Emlékbeszéd Eötvös Loránd sírjánál

Rekultivált hulladéklerakó térbeli lehatárolása multielektrodás
geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések alapján
Rezervoárheterogenitás hatásának numerikus vizsgálata
a visszasajtoló kutak nyomásviszonyaira
Feldolgozások a dunántúli MTOA-03 (CEL08) magnetotellurikus
alapszelvény mentén

CBGA 2026
Renewbalkan 2026

In memoriam
Dr. Aczél Etelka
George Sideris



MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

67. évfolyam (2026) 1. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

TARTALOM • CONTENTS

SZERKESZŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 3 Köszönet Petró Erzsinek (Thanks to Erzsí Petró) – *Szerkesztőség*
- 4 Professzor Dr. Dobróka Mihály „A Miskolci Egyetem Iskolateremtő Professzora” elismerést kapta egyetemétől (Professor Dr. Mihály Dobróka received the “School-Creating Professor of the University of Miskolc” award from his university) – *Szabón. P.*

MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS (AHG)

- 5 A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2026. évi Közgyűlése (General Assembly of AHG) – *Pintér M., Szerkesztőség*
- 9 Ifjú Szakemberek Ankétja – Szarvas, 2026. március 27–28. (Meeting of Young Professionals – 2026) – *Hegedűsné Petró E.*
- 11 Emlékbeszéd Eötvös Loránd sírjánál (Memorial speech at the grave of Roland Eötvös) – *MGE Titkárság*

TANULMÁNY • PAPER

- 13 Rekultivált hulladéklerakó térbeli lehatárolása multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések alapján (Spatial delineation of a reclaimed landfill based on multielectrode geoelectric and excited polarization measurements) – *Szilvási M., Havasi I.*
- 26 Rezervoárheterogenitás hatásának numerikus vizsgálata a visszasajtoló kutak nyomásviszonyaira (Numerical investigation of the effect of reservoir heterogeneity on the pressure relationships of injection wells) – *Nagy B., Markó Á., Galsa A., Molnár B.*
- 43 Feldolgozások a dunántúli MTOA-03 (CEL08) magnetotellurikus alapszelvény mentén (Processing along the Transdanubian MTOA-03 (CEL08) magnetotelluric core profile) – *Kiss J., Szébenyi R. M.*

HÍREK • NEWS

- 55 CBGA 2026 – *Szerkesztőség*
- 56 Renewbalkan 2026 – *Szerkesztőség*

IN MEMORIAM

- 57 Dr. Aczél Etelka – *A Magyar Geofizika Szerkesztőbizottsága*
- 58 George Sideris – *Szerkesztőség*

MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

67. évfolyam (2026) 1. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

Főszerkesztő • Editor-in-Chief

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: mageofedit@gmail.com

Szerkesztőbizottság • Editorial Board

DR. GALSA ATTILA, DR. KISS JÁNOS, DR. LÓRINCZ KATALIN,

DR. NÁDASI ENDRE, DR. SZABÓ NORBERT PÉTER

Technikai szerkesztő • Technical Editor

HOCK GÁBOR

E-mail: mageoftechn@gmail.com



Lapunk e számának megjelenését a
Magyar Tudományos Akadémia
támogatja

A szerkesztőség a szakcikket (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évszám zárójelében tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességéért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete

A kiadásért felel: Breitner Dániel

Szerkesztőség: 1143 Budapest, Stefánia út 14.

Telefon: (06) 30-811-8819

Titkársági e-mail: geofizikusok@gmail.com

Honlap: www.mageofegy.hu

Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507

HU ISSN 2677-1497 (online)

Köszönet Petró Erzsinek

Kedves Titkárunknak igazán jól kiérdemelt nyugalomba vonulásakor a *Magyar Geofizika* Szerkesztőbizottsága őszinte köszönetét fejezi ki a hosszú éveken át tartó zavartalan közös munkáért és a lap nem mindig könnyű adminisztrációs ügyeinek gördülékeny intézéséért.

Kedves Erzsi, még nagyon sok kellemes, jó egészségben, a családotd körében eltöltött évet kívánunk!



*A Magyar Geofizika
Szerkesztősége*

Professzor Dr. Dobróka Mihály „A Miskolci Egyetem Iskolateremtő Professzora” elismerést kapta egyetemétől



Professzor Dr. Dobróka Mihály

A Miskolci Egyetem 2026. január 29-i ünnepi szenátus-ülésén került sor „A Miskolci Egyetem Iskolateremtő Professzora” elismerő oklevél átadására, amelyet prof. dr. Dobróka Mihály professor emeritus vehetett át. A szenátus első alkalommal ítélte oda a kitüntetést az egyetem történetében a műszaki-természettudományi területen kimagasló oktatói és tudományos életmű elismeréseként. Az elismerés a doktori képzésben és a tudományos utánpótlás-nevelésben nyújtott kiemelkedő teljesítmény alapján adományozható olyan egyetemi tanároknak, kutatóprofesszoroknak és professor emeritusoknak, akik a doktori iskolák törzstagjaiként meghatározó szerepet töltenek be az egyetem tudományos közösségének fejlődésében.

Dobróka Mihály professzor 1948. április 10-én született Gyöngyösön. Általános és középiskolai tanulmányait követően a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Természettudományi Karán szerzett 1972-ben okleveles fizikus diplomát. Pályáját a Miskolci Egyetem Fizikai Tanszékén kezdte tudományos ösztöndíjas gyakornokként, majd

kutatómunkáját a plazmafizika területén alapozta meg, amelyből 1977-ben az Eötvös Loránd Tudományegyetemen védte meg egyetemi doktori értekezését. Ezt követően egyetemi adjunktussá nevezték ki, és a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén folytatta oktatói és kutatói tevékenységét. A Geofizikai Tanszéken 1983-tól kezdődően adjunktusként, majd docensként, 1997-től egyetemi tanárként dolgozott egészen 2018-as nyugdíjazásáig. Oktatói munkájában meghatározó szerepet játszott a geofizikus-mérnökképzés modernizálása: bevezette a „geofizikai inverzió” tárgyat, és kezdeményezte a geofizikai inverziós módszerek fejlesztését, amelyek a miskolci geofizikai iskola nemzetközileg is elismert kutatási irányává váltak. Telephullám-szeizmikai kutatások terén 1986-ban kandidátusi, majd 1996-ban az MTA doktora címet szerzett. 1997-ben egyetemi tanári kinevezést kapott, a Geofizikai Tanszék vezetője lett, később intézetigazgató, valamint tudományos rektorhelyettes.

A doktori képzésben meghatározó szerepet töltött be: alapító törzstagja és későbbi vezetője volt a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolának, valamint több cikluson át a Miskolci Egyetem Doktori Tanácsának elnöke. Témavezetői tevékenysége során 24 doktoranduszt irányított, akik közül eddig 16 szerzett PhD-fokozatot. Kutatásai a plazmafizikától a geofizikai inverziós és tomográfiai módszerekig terjednek; különösen jelentős az együttes (joint) inverzió, a sorfejtéses inverzió és a kőzetfizikai kutatások hazai bevezetése, amelyek új, nemzetközileg is elismert kutatási irányokat teremtettek a Geofizikai Tanszéken. Tudományos eredményeit 119 közleményben és 97 nemzetközi konferencia-előadásban publikálta, összesen 345 közleménnyel és 792 független hivatkozással.

Széles hazai és nemzetközi szakmai kapcsolatrendszerrel rendelkezik, aktív szereplője a Magyar Geofizikusok Egyesületének és az MTA tudományos testületeinek. Több nemzetközi együttműködésben vett részt, hosszabb kutatói időszakot töltött a németországi Ruhr Egyetemen. Munkássága jelentősen hozzájárult a Miskolci Egyetem nemzetközi tudományos elismertségének növeléséhez. Életpályája, iskolateremtő kutatói és oktatói tevékenysége, valamint a doktori képzésben betöltött kiemelkedő szerepe méltóvá tette az „A Miskolci Egyetem Iskolateremtő Professzora” kitüntető címre. A Geofizikai Tanszék valamennyi munkatársa nevében szívből gratulálunk a kitüntetéshez.

Szabó Norbert Péter,
tanszékvezető egyetemi tanár

A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2026. évi Közgyűlése

A Magyar Geofizikusok Egyesülete (MGE) 2026. évi Közgyűlésének helyszíne az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület (OMBKE) budapesti székháza volt. Jelenléti ív szerint a Közgyűlésen 55 résztvevő jelent meg.

A közgyűlés a Himnusz eléneklésével kezdődött, ezután *Breitner Dániel*, az MGE Elnök köszöntötte a megjelenteket.



Breitner Dániel, az MGE elnöke üdvözli a Közgyűlést

A köszöntés után a Közgyűlés napirendjének, illetve a jegyzőkönyvvezető valamint a jegyzőkönyv hitelesítők személyének elfogadására került sor. Jegyzőkönyvvezetőnek *Pintér Máriát*, hitelesítőknek *Török Istvánt* és *Pályi András*t kérték fel.

Breitner Dániel elnök ezután köszöntötte az Egyesület jelenlegi jogi tagjait, vagyis a következőket:

ELGOSCAR Környezettechnológiai Zrt.
Geo-Log Kft.
Acoustic Kft.
Geomega Kft.
Mecsekérc ZRt.
O&GD Central Kft.
MS Energy Solutions Kft.
Biocentrum Kft.
Zelei Consulting Bt.
SZTFH
FÖCIK

Ezt követően az elnök felkérte a jelenlévőket, hogy egyperces néma felállással emlékezzenek meg a 2025-ben elhunyt tagtársokról:

Ádám Antal *Tóth Tamás*
Dörnyei Piroska *Turai Endre*
Márton Péterné *Verő József*
Nagy Zoltánné *Verő László*

A megemlékezést követően az elnök felkérte *Berezcki László* általános titkárt a 2025. évi beszámoló megtartására.



Berezcki László általános titkár a beszámolóját tartja

Berezcki László elmondta, hogy Egyesületünk létszáma az elmúlt év során csökkent, jelenleg 429 tagunk van, majd rátért a 2025. év fontosabb eredményeire:

- Alapszabályunkat betartva végeztük tevékenységünket, az elnökségi ülések gyakoriságára (online ülések), a tájékoztatási kötelezettségre és a közgyűlés előkészítésére vonatkozóan, megtartottuk Egyesületünk működési kereteit taglétszám és közhasznúsági mutatók tekintetében.
- Szakmai tevékenységünk keretében az évtizedek folyamán kialakult hagyományos időben, március végén megtartottuk az Ifjú Szakemberek 2025. évi Ankétját Hévízen. A rendezvényen 61 fő vett részt, ahol 28 szóbeli és 10 poszterelőadás bemutatására került sor.
- 2025. októberében megtartottuk a „60 éves az algyői olaj- és gázmező” című előadó délutánunkat.
- Sajnos egyéb rendezvényt helyszín hiányában nem tudunk tartani 2025-ben.

- 2025. szeptemberében megtarthattuk – immár egyesületi szervezésben az alapítvány felszámolása miatt - szenior tagjaink által évek óta várva várt egész napos szenior kirándulást a Tisza-tóhoz, melynek nagy sikere volt a résztvevők körében.
- 2025. júliusában bejegyezték Egyesületünk új székhelyét: 1143 Budapest, Stefánia út 14. Ezúton is köszönjük a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságának, hogy helyet adtak az Egyesület működéséhez, mivel a Columbus utcából ki kellett költöznünk, illetve engedélyezték, hogy az MGE-t a Stefánia úti épületükbe jegyezze be székhelyként a Fővárosi Törvényszék.
- Meg kellett változtatnunk email-elérhetőségünket is, mert sajnos a korábban használt levelezési rendszerünk elveszett akkor, amikor új számítógépre került az Egyesület valamennyi adata, dokumentumai.
- A területi csoportjaink működése sajnos eléggé lecsökkent, mert szinte már csak nyugdíjas kollégák alkotják a taglétszámukat. A létszám is drasztikusan csökken, munkahely – ezzel együtt tevékenységváltoztatás – miatt, illetve amiatt is, hogy sajnos több idős tagtársunkat vesztettük el az elmúlt időszakban.
- A *Magyar Geofizikát* 2025-ben 4 alkalommal megjelentettük online, és a lap új weboldalra került (<https://hugeo.hu>), ahol az SZTFH biztosítja a helyet a *Magyar Geofizika* lapszámainak feltöltésére, de természetesen az Egyesület honlapján is megtalálhatóak a *Magyar Geofizika* számai. Az Országos Széchényi Könyvtár együttműködési megállapodásunk értelmében folyóirat minden újonnan megjelenő számát feltölti a világhálóra, valamint az EPA rendszerben is elérhetőek a lapszámok.
- Működik, és folyamatos feltöltés alatt van új honlapunk: www.mageofegy.hu
- A nemzetközi kapcsolatainkat továbbra is ápoljuk: szervezeti tagság, konferencia részvétel (EAGE, SEG stb.).
- 2025-ben is gondot fordítottunk arra, hogy ápoljuk hazai kapcsolatainkat (MFT, FÖCIK, OMBKE, SZTFH, jogi tagok, támogatók, segítők, hatóságok stb.).
- A Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatóságával (SZTFH) jó kapcsolatot ápolunk, továbbra is segítik Egyesületünk működését
- Az Egyesület gazdálkodására vonatkozó törvényi és egyesületi előírásokat maximálisan betartva takarékos gazdálkodásra törekedtünk; bevételeink között szerepelnek a tagdíjak, a pályázatokon elnyert összegek, az államkötvénybe fektetett megtakarításunk kamata és a személyi jövedelemadóból beérkező 1%-os felajánlások.
- Folyamatosan igyekszünk erősíteni az egyéni felelősségvállalást az egyesületi életben: tagdíjfizetés, SZJA 1%, társadalmi összefogás a feladatok megoldásában.
- Közhasznúsági tevékenységünket továbbra is folytattuk, így közhasznú státuszunkat 2025-ben is meg tudtuk tartani.
- Sikeresen lezajlott a 2025. évi Földtani és Geofizikai Vándorgyűlés Egerben, az immár kialakult szokásoknak megfelelően a Magyarhoni Földtani Társulattal közös szervezésben.
- Hagyományaink ápolása és kegyeleti tevékenység: Eötvös Loránd sírjának koszorúzása, a sír gondozása, melyre intézmények, cégek, szervezetek, iskolák képviselőit hívtuk meg 2025-ben is.

Breitner Dániel megkérdezi, hogy az elhangzott titkári beszámolóval kapcsolatban van-e kérdés, észrevétel? Nem érkezett sem kérdés, sem hozzászólás. Felkéri *Kaszás Lászlót*, az Egyesület FB elnökét, hogy tartsa meg beszámolóját 2025. évről.

Kaszás László, az MGE Felügyelőbizottságának (FB) elnöke elmondja, hogy az FB alaposan megvizsgálta az Egyesület 2025. évi gazdálkodását, és mindent a legnagyobb rendben talált, az FB-hez 2025-ben panasz, illetve bejelentés nem érkezett.

Az FB beszámolóját követően az elnök megkérdezi, hogy van-e hozzászólás, kérdés az FB beszámolójával kapcsolatban. Mivel kérdés, illetve hozzászólás nem volt, felkéri a jelenlévőket, hogy szavazzanak az elhangzott be-



Szavazás az MGE 2026. évi Közgyűlésén

számolókról. A szavazás után megállapítja, hogy egy tartózkodással, ellenszavazat nélkül elfogadta a Közgyűlés a titkári beszámolót, és ugyancsak egy tartózkodással, ellenszavazat nélkül elfogadta a Felügyelőbizottság beszámolóját is.

Breitner Dániel elmondja: ilyenkor szoktuk meghallgatni a Magyar Geofizikusokért Alapítvány beszámolóját, de ez most már elmarad, mert a tavalyi évben beadtuk a Fővárosi Törvényszékhez az Alapítvány felszámolásáról szóló kezdeményezést. Egyelőre visszajelzés nincs ezzel kapcsolatban, de azt tudjuk, hogy ez az eljárás akár éveig is eltarthat.

A 2025. évi beszámolókat követően a Közgyűlés a 2026. évi tervekkel foglalkozott. Az elnök felkéri *Bereczki László* általános titkárt, hogy ismertesse a jelenlévőkkel az Egyesület 2026. évi pénzügyi tervét.

Bereczki László általános titkár elmondja:

- Az MGE Titkárságán személyi változás történt, *Hege-dúsné Petró Erzsébet* 2026. április végével befejezi munkáját. Méltatta Erzsébet 18 évi egyesületi munkáját, és bejelentette, hogy május elsejével *Pintér Mária* (Marcsi) veszi át a Titkárságon az ügyvezető titkári pozíciót, kíván neki jó munkát.
- Az Egyesület 2026. évi pénzügyi tervet kivetíti a jelenlévőknek:
- A táblázaton látható, hogy hasonló számokat tervezett az Egyesület a 2026-os évre is, mint amilyenek 2025-ben voltak. A tavalyi évhez képest egy kicsit magasabb bevétellel és egy kicsit magasabb kiadással számolunk. A bevételeknél a támogatásoknál kevesebb összegre számítunk, ezért kicsit óvatosabb a tervezés. A bevételeknél *Zelei Gábornak* és a FÖCIK pályázatnak köszönhetően ismét támogatáshoz jutottunk. Pályázati pénzekre is számítunk, de az kiszámíthatatlan.
- Az Egyesület alaptörvényét továbbra is lekötjük, általában egy évre, bár a kamatok csökkennek, de még mindig ez a legbiztosabb formája annak, hogy megőrizzük a megtakarításunkat.
- A bérköltség kicsit magasabb lesz, mert az új ügyvezető titkár nem nyugdíj mellett dolgozik, így a járulékok magasabbak, de ahogy *Breitner Dániel* elnök jelezte, hogy tárgyalásokat folytat több leendő jogi taggal és ezek bízhatóak.

Breitner Dániel felkéri *Kaszás Lászlót*, az FB elnökét, hogy ismertesse az FB véleményét a 2026-os pénzügyi tervvel kapcsolatban.

Kaszás László előadja, hogy a Felügyelőbizottság megkapta a 2026. évi pénzügyi tervet, és megállapította, hogy éppen olyan takarékos gazdálkodást irányzott elő 2026-ra az Egyesület, mint amilyen volt 2025-ben is. A Magyar Geofizikusok Egyesületének 2026. évi pénzügyi tervét a Felügyelőbizottság elfogadásra javasolja.

Az elnök megkérdezi, van-e hozzászólás, kérdés a 2026-os pénzügyi tervhez, majd ennek hiányában megkéri a jelenlévőket, hogy szavazzanak az Egyesület 2026. évi pénzügyi tervének elfogadásáról.

A Közgyűlés ellenszavazat nélkül, egy tartózkodással elfogadta a Magyar Geofizikusok Egyesületének 2026. évi pénzügyi tervét.

Breitner Dániel elmondja, hogy *Bereczki László* 2×3 éves általános titkári ciklusa lejárt, a kinevezés tovább már nem hosszabbítható, ezért új általános titkárt kell választani a közgyűlésnek, majd felkéri *Bauer Márton* a Jelölőbizottság elnökét, hogy ismertesse az általános titkári megbízásra érkezett jelöléseket.

Bauer Márton ismerteti, hogy előzetesen egy jelölés érkezett *Zelei Gáborra*. Jelzi, hogy ha a jelenlévő között van olyan, aki szeretne más javasolni, jelezze és a jelölt rákerülhet a szavazólapra, de mivel más jelölés nem érkezett, így a Jelölőbizottság elnöke felolvassa *Zelei Gábor* laudációját, és ismerteti a szavazás módját.

Az elnök ezután 30 perc szünetet rendel el, a szavazás ezalatt történik meg. A szünet után a közgyűlés az idei ISZA közönségdíjas előadásának meghallgatásával folytatódik. Az előadó *Mohamed Ayed Elbalawy* – a Miskolci Egyetem doktoranduszhallgatója.

Breitner Dániel megköszöni az előadást, és elmondja, hogy most a kitüntetések átadása következik, és felkéri *Sóron András*t, hogy olvassa fel az idei kitüntetések listáját.

Sóron András bejelenti:

- Az „év cikke” Meskó Attila- és Csókás János-díjakat kapják az Egyesület Tudományos Bizottsága által kiválasztott, 2025-ben megjelent legjobb cikkek írói.
- Meskó Attila-díj: *Porkoláb Kristóf*: Elasztikus termobarometria – módszertani áttekintés cikkéért. (*Földtani Közlöny*, 155(3), 181–193.)
- Csókás János-díj: *Baracza Mátyás Krisztián*: Szimulációs adatokon tanított neurális háló alkalmazása a mélyfúrású hőcserélők teljesítményének előrejelzésére (Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban, 2025, Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának konferenciakiadványa, Miskolc, pp. 93–98.)

További kitüntetések:

- Renner János-díj: *Timár Gábor* és *Sőreg Viktor*
- Egyed László-díj: *Bodoky Tamás* és *Szűcs István*



A Renner János-díjat *Timár Gábor* kapta

- Tiszteleti tag kitüntetés (magyar) Zilahi-Sebess László és (külföldi) Jadwiga Anna Jarzyna
- Emléklap kitüntetés: Nádasi Endre Kázmér



Az ISZA díjainak átadása

Ezután az Ifjú Szakemberek Ankétján elnyert díjak átadása következett, a díjak felsorolása az MGE 2026. évi ISZA-beszámolójában található meg.

Az ISZA-díjak átadása után az elnök köszönetet mondott *Hegedűsné Petró Erzsébet*nek, *Bereczki Lászlónak*, *Virók Andrásnak*, valamint *Cserép Barbarának* (MFT Ifjúsági Bizottságának elnöke) az ISZA koordinálásáért és megszervezéséért.

Ezt követően az elnök felkérte *Török Istvánt*, a Szavatszámoló Bizottság elnökét, hogy ismertesse a szavazás eredményét.

Török István bejelentette, hogy 42 érvényes szavazat érkezett *Zelei Gábor* általános titkárra, így ellenjelölt és ellenszavazat nélkül a következő három évre *Zelei Gábort* vá-

*Hegedűsné Petró Erzsébet* köszöntése

lasztotta meg az MGE közgyűlése az Egyesület általános titkárának.

Breitner Dániel gratulált a megválasztott általános titkárnak és megköszönte a Szavatszámoló és a Jelölőbizottság munkáját, valamint a jelenlévőknek a részvételt.

Az elnök felkérte *Zelei Gábor* új általános titkárt, hogy cseréljenek helyet *Bereczki Lászlóval*. Megköszönte *Bereczki László* 6 éves munkáját. Köszönetet mond *Hegedűs Endréné Petró Erzsébet*nek a 18 éves áldozatos és kiváló egyesületi munkájáért mind a maga, mind az Egyesület nevében. *Bereczki László* pedig egy képes videó-összeállításban mutatta be Erzsé munkásságát, az Egyesületben betöltött szerepét összehasonlítva a világban történt eseményekkel.

Ezek után az elnök bezárta a Közgyűlést felkérve a jelenlévőket a Bányász Himnusz eléneklésére.

Pintér Mária titkár jegyzőkönyve alapján összeállította a *Szerkesztőség*

Ifjú Szakemberek Ankétja

Szarvas, 2026. március 27–28.



2026. évi ISZA MGE-rendezvény résztvevői

2026. március 27-én és 28-án Szarvason rendezte meg a Magyar Geofizikusok Egyesülete az Ifjú Szakemberek 56. Ankétját. A rendezvénynek 63 résztvevője volt, az Ankét során 25 szóbeli és 10 poszterelőadás bemutatására került sor.

A magyar fiatal kutatók, doktoranduszok és egyetemi hallgatók mellett, az előadók idén is számos más országból érkeztek az ifjú szakemberek a rendezvényére, hogy bemutassák kutatási eredményeiket.

A 6 tagú zsűrinek (*Virág Attila, Zahuczki Péter, Sendula Eszter, Csizmeg János, Spránitz Tamás, Rubóczki Tibor*) idén is nehéz dolga volt, mert az előadások színvonala ebben az évben is magas volt, így nehéz volt ezeket rangsorolni és az egyesületi díjakhoz (gyakorlati, elméleti és poszter kategória) hozzárendelni. Az egyesületi díjak mellett 12 különdíjat osztottak ki, amely díjakat az adományozói ítéltek oda, valamint kiosztották a közönség által legjobbnak talált előadásnak ítélte díjat, a közönség díjat is.

A díjak átadására az Egyesület rendes, 2026. évi közgyűlésén került sor, ahol a jelenlévők meghallgathatták a különdíjjal jutalmazott előadást.

A rendezvényt a hollandiai központú EAGE (European Association of Geoscientists and Engineers) idén is 500 euróval támogatta.

Az ISZA díjazottjainak a névsora:

Gyakorlati kategória:

1. díj: Catarina Conceicao De Castro
2. díj: *Ahmed Osama Kamal Mohamed*
3. díj: *Mohamed Ayed Elbalawy*

Elméleti kategória:

1. díj: *Molnár Bence*
2. díj: *Horváth Laura*
3. díj: Velki Máté

Poszterkategória:

1. díj: *Gajzer Anna*
2. díj: *Kovács Dániel*
3. díj: *Molnár Bence*

Küöldíjak

Közönségdíj: *Mohamed Ayed Elbalawy*

MFT különdíj: *Kovács Dániel*

MFT IB: *Catarina Conceicao De Castro*

Geo-Log Kft.: *Hadeer Hassan*

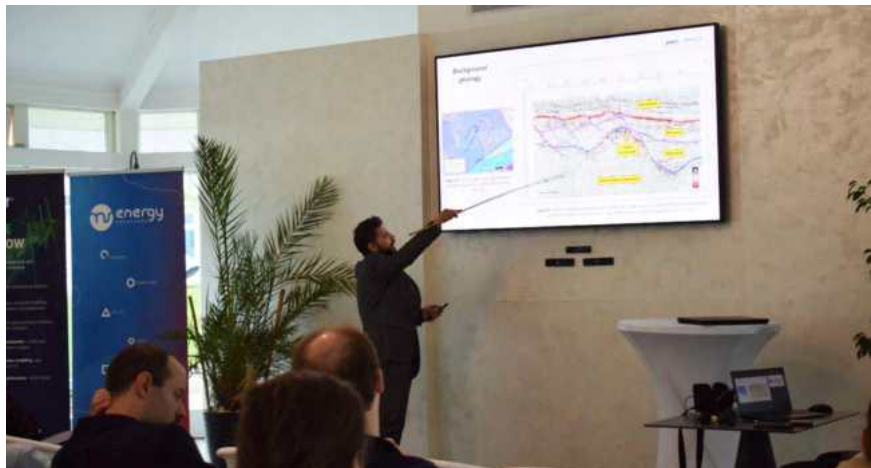
Mín-Geo Kft.: *Garcia Reyana Dawn*

MS Energy Solutions Kft.: *Mohamed Ayed Elbalawy*

Biocentrum Kft.: *Anwar Al Hijouj*
Böckh János-díj: *Rábóczki Bence*
Szilárd József-díj: *Barbély Enikő*
Aspect Energy Services: *Stefán Boglárka Abigél*
Geomega Kft.: *Vári Zoltán*

GISkard: *Gilányi Gibárt*
Mhyner Geoconsulting Kft.: *Winkler Zsuzsanna*
RFD – Navigator: *Nagy Bence*

Hegedűsné Petró Erzsébet,
MGE Titkárság



Egy érdekes előadás



A hallgatóság



A szigorú zsűri munkában

Megemlékezés és koszorúzás Eötvös Loránd sírjánál

Április 10-én a Fiumei úti sírkertben tartott megemlékezést a Magyar Geofizikusok Egyesülete (MGE), ahol a megjelentek tiszteletüket tették báró Eötvös Loránd, a magyar tudomány és a geofizika kiemelkedő alakja előtt az Egyesület hagyományainak megfelelően a nagy tudós halálának 107. évfordulója alkalmából.

Az eseményen Breitner Dániel, az MGE elnöke mondott beszédet:

„Tisztelt Emlékezők!

Köszönöm, hogy ilyen sokan megjelentek ma itt. Breitner Dániel vagyok, a Magyar Geofizikusok Egyesületének elnöke.

Ha bárki esetleg számított is rá, el kell keserítsem: nem készültem olyan beszéddel, amely hosszan ecseteli Eötvös Loránd geofizikai munkásságát. Úgy gondolom, szerepe ennél sokkal több volt, és talán leginkább emiatt vagyunk ma itt.

Igen, Eötvös Loránd neve összefonódott a magyar tudomány és azon belül a geofizika történetével. Munkássága máig meghatározza azt, ahogyan a Föld szerkezetét és a természet apró, de mérhető jelenségeit vizsgáljuk. Az általa megalkotott torziós inga olyan pontosságot tett lehetővé, amelynek hatása ma is érezhető a földtani- és nyersanyagkutatásokban. És talán a legismertebb hazai geofizikusnak tekinthető.

Azonban Eötvös példája nemcsak tudományos, hanem emberi értelemben is követendő. Saját vagyonát a kutatás, az oktatás és a fiatal tudósok támogatására fordította. Megértette és megélte, hogy a tudományba fektetett pénz nem veszendő, hanem hosszú távon gazdagítja az országot – nemcsak anyagi, hanem szellemi értelemben is. Ma, amikor a technológiai fejlődés minden egyes kihívásánál földtani és nyersanyagkutatási problémákba ütközünk, amikor ráébredünk, hogy az ellátórendszerek mennyire sérülékenyek, és minden ország próbálja kiaknázni a hazai nyersanyag-előfordulásait, különösen fontos, hogy megfelelő



Breitner Dániel megemlékezik Eötvös Loránd sírjánál

támogatást és társadalmi megbecsülést kapjon ez a tudományterület.

A mai koszorúzással nemcsak a tudós emlékét őrizzük, hanem megerősítjük azt a gondolatot, hogy értékteremtő tudás nélkül nincs előrehaladás. Eötvös Loránd munkája bizonyította: ha a kutatásra figyelmet és erőforrást fordítunk, az eredményei generációkon át meghatározzák a közös jövőnket.

Remélem, egyszer még sokan fogják követni a példáját!”

A beszédet követően Breitner Dániel helyezte el az első koszorút, majd a megjelent szervezetek és intézmények képviselői is lerótták tiszteletüket Eötvös Loránd sírjánál.

A megemlékezés a tudós munkássága előtti tisztelgés mellett annak üzenetét is megerősítette, hogy értékteremtő tudás és kutatás nélkül nincsen haladás.

MGE Titkárság



Koszorú elhelyezése az ELGA nevében

Rekultivált hulladéklerakó térbeli lehatárolása multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések alapján

SZILVÁSI M.[@], HAVASI I.[&]

Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Miskolc
[@]E-mail: marcell.szilvasi@uni-miskolc.hu; [&]E-mail: istvan.havasi@uni-miskolc.hu

A tanulmány egy rekultivált, a mai előírásoknak nem megfelelő módon kialakított hulladéklerakó felett végzett roncsolásmentes geofizikai vizsgálatok eredményeit mutatja be. A kutatás célja a felszín alatti hulladéktest lehatárolása, valamint a potenciálisan szennyezett zónák kimutatása volt. A mérések során hét szelvény mentén multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs adatgyűjtést végeztünk, amelyekből 2D inverziós modelleket készítettünk. A több szelvényből származó adatok térbeli integrálása érdekében a topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelési eljárást alkalmaztunk, amely biztosítja az azonos mélységi szintek konzisztens értelmezését változó felszín esetén is. Az így előállított horizontális eloszlástérképek lehetővé tették a hulladéktest és a kapcsolódó anomáliák kvázi-háromdimenziós értelmezését. A hulladéktest vastagsága átlagosan 4–8 m, lokálisan elérheti a ~13 m-t. A szennyeződésre utaló geofizikai anomáliák több helyen a hulladéktest alá is kiterjednek. A kvantitatív összehasonlítás igazolta, hogy a topográfiakorrigált szeletelés javítja a térbeli interpretáció geometriai konzisztenciáját anélkül, hogy torzítaná az adatrendszert.

Kulcsszavak: hulladéklerakó, multielektrodás geoelektromos mérés, gerjesztett polarizáció, horizontális szeletelés, környezeti geofizika

Szilvási, M., Havasi, I.: Spatial delineation of a reclaimed landfill based on multielectrode geoelectric and excited polarization measurements

This study presents the results of non-destructive geophysical investigations carried out above a reclaimed landfill that does not meet current engineering standards. The aim of the research was to delineate the subsurface waste body and to identify potentially contaminated zones. Multi-electrode geoelectrical and induced polarization surveys were carried out along seven profiles, and 2D inversion models were generated. To integrate the data from multiple profiles into a common spatial framework, we used a topography-adaptive horizontal slicing approach, which ensured consistent interpretation of equivalent depth levels even under variable surface conditions. The resulting horizontal distribution maps enabled a quasi-3D interpretation of the waste body and associated anomalies. The waste body has an average thickness of 4–8 m and locally reaches approximately 13 m. Geophysical anomalies related to contamination extend beneath the waste layer in several areas. Quantitative comparison demonstrated that the topography-corrected slicing improves the geometric consistency of spatial interpretation without introducing distortion into the dataset.

Keywords: landfill, multi-electrode geoelectrical surveys, induced polarization, horizontal slicing approach, environmental geophysics

Beérkezett: 2026. március 10.; *elfogadva:* 2026. április 13.

1. Bevezetés

A rekultivált, illetve a mai előírásoknak már nem megfelelő módon kialakított hulladéklerakók környezeti kockázatot jelenthetnek. Ezért térbeli kiterjedésük, belső szerkezetük és a lehetséges csurgalékterjedés roncsolásmentes vizsgálata kiemelt jelentőségű. A multielektrodás geoelektromos mérés és a gerjesztett polarizáció (GP) széles körben alkalmazott módszerek az ilyen területek vizsgálatában, mivel érzékenyek a hulladéktest, a csurgalékkal érintett zónák, valamint a természetes fedő- és aljzatrétegek közötti közetfizikai különbségekre (Bernstone et al., 2000; Cardarelli és Di Filippo 2004, Chambers et al. 2006, Guinea et al. 2022), és kombinált alkalmazásuk az inverziós feldolgozás során tovább javíthatja a különböző fizikai paraméterek közös értelmezhetőségét (Gyulai et al. 2014).

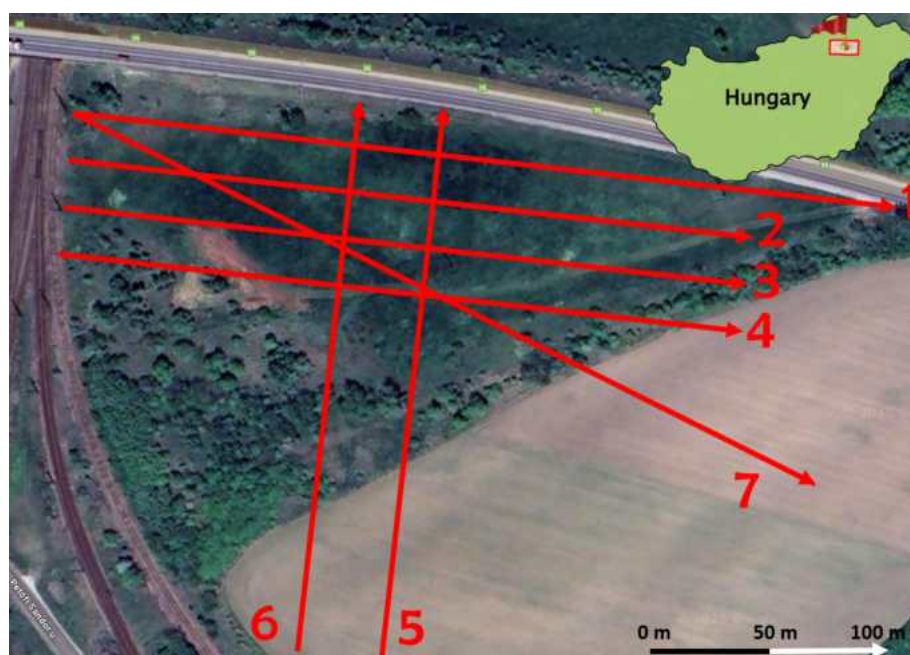
A kutatás célterülete Magyarország északkeleti részén, Nyékládháza település belterületén található rekultivált hulladéklerakó. A területet a 35-ös számú főút és egy vasúti pályaszakasz határolja. A vizsgálatok célja a felszín alatti hulladéktest lehatárolása, valamint az abból esetlegesen kiszivárgó szennyezőanyagok roncsolásmentes, felszínközeli geofizikai módszerekkel történő vizsgálata volt.

Korábbi geoelektromos vizsgálatok során gyakran csak egy vagy néhány szabálytalan nyomvonalú szelvény mentén történtek mérések, amelyek korlátozott lehetőséget biztosítottak a háromdimenziós értelmezéshez. A nemzetközi szakirodalom ugyanakkor arra utal, hogy több, rendezett geometriájú 2D szelvény együttes feldolgozása és térbeli integrálása jelentősen javíthatja a lerakótest és a csurgalékszónák értelmezhetőségét, különösen olyan helyszíneken, ahol a teljes 3D elektródaháló telepítését a terepi viszonyok korlátozzák (Maurya et al. 2017, Martorana et al.

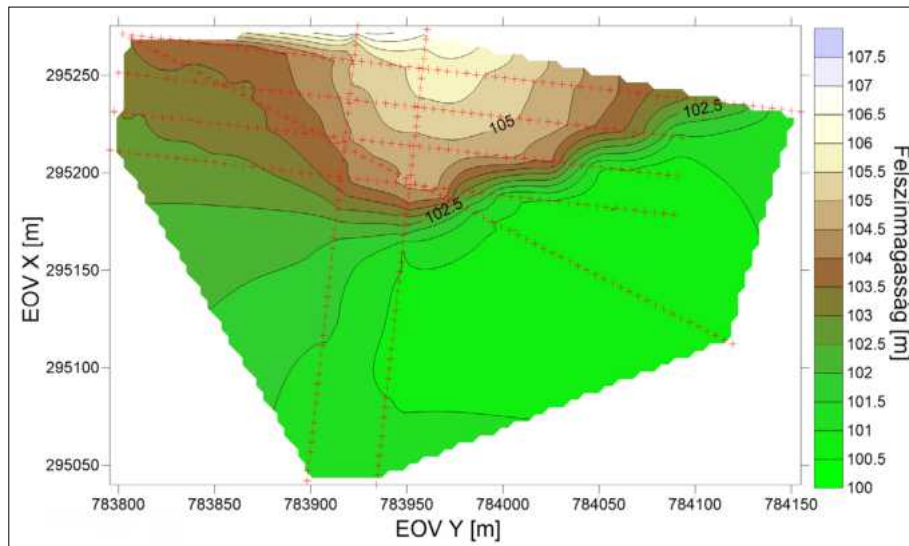
2023). A jelen kutatás során ezért a szelvények elrendezését egy rendezettebb, geometriailag strukturált hálózat szerint terveztük meg. A vizsgált hulladéklerakót korábban Pappné Molnár és Török (1997), valamint Tóth és Szabó (1999) tanulmányozták különböző geofizikai módszerekkel TDK dolgozataikban. A jelen kutatás kezdeti eredményei korábban konferenciákon és publikációkban is bemutatásra kerültek (Turai és Szilvási 2017, Szilvási és Turai 2018).

A vizsgálatok során multielektrodás egyenáramú geoelektromos méréseket végeztünk. A mérésekhez egy 72 csatornás SYSCAL (Iris Instruments) mérőműszert használtunk. A gerjesztett polarizációs módszert az 1950-es évektől alkalmazzák geofizikai kutatásoknál, kezdetben elsősorban érckutatási célokra (Wait 1959, Keller és Frischknecht 1966, Sumner 1976). Később ez a módszer a környezeti geofizikai vizsgálatokban is elterjedt, mivel érzékeny a különböző szennyeződésekkel összefüggő közetfizikai változásokra (Kearey et al. 2002). Az időtartományban mérhető látszólagos polarizálhatósági görbe integráltranszformációval írható le (Turai 1981), és az időállandók alapján különböző polarizációs mechanizmusok különíthetők el. Számos újabb hulladéklerakó-vizsgálat szerint a GP az ellenállásmérések hasznos kiegészítője lehet a biogeokémiailag aktív, illetve csurgalékkal érintett zónák feltárásában (Gazoty et al. 2012, Flores-Orozco et al. 2020, Chao et al. 2024).

E tanulmány célja annak bemutatása, hogy rendezett geometriájú szelvényezéssel, precíz geodéziai előkészítéssel, multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérésekkel, 2D inverzióval és a szelvények közös térbeli integrálásával miként határozható le egy rekultivált hulladéklerakó testhelyzete és a hozzákapcsolódó poten-



1. ábra | A vizsgált terület műholdfelvétele a geoelektromos mérési szelvények elrendezésével
Figure 1 | Satellite image of the study area showing the layout of the geoelectrical survey lines



2. ábra | A vizsgált terület topográfiai térképe, piros keresztekkel jelölt elektródahelyekkel
 Figure 2 | Topographic map of the study area with electrode locations marked by red crosses

ciálisan szennyezett zónák térbeli kiterjedése. Emellett a tanulmány egy egyszerűsített horizontális szeletelési eljárás alkalmazhatóságát is bemutatja változékony topográfia esetén. Ugyanakkor a szakirodalomban viszonylag kevés olyan megközelítés található, amely a több 2D szelvényből származó inverziós eredmények topográfiát is figyelembe vevő, kvantitatívan értékelt térbeli integrációjára fókuszál. A jelen kutatás egyik célja e hiány pótlása.

2. Vizsgálati terület és geodéziai előkészítés

A vizsgált terület megközelítőleg 300×80 m kiterjedésű, a mélybeli térrész megfelelő lefedéséhez azonban ennél nagyobb, mintegy $70\,000$ m²-es felszíni terület bevonása vált szükségessé. A hét mérési szelvény elhelyezkedését az 1. ábra mutatja. A szelvények orientációjának egyértelmű rögzítése a későbbi térbeli értelmezés szempontjából különösen fontos volt.

A mérésekhez használt IRIS SYSCAL PRO műszer 72 csatorna kezelésére alkalmas, ezért 5 m elektródátávolságot alkalmaztunk. Ennek megfelelően a maximális terítés 355 m volt. Az 1. és 7. szelvényt teljes hosszúságban, a 2., 3. és 4. szelvényt 295 m-es, az 5. és 6. szelvényt pedig 235 m-es terítéssel mértük meg. A négy párhuzamos szelvény egymástól 20 m-re, a két rájuk merőleges keresztzelvény 36 m-re helyezkedett el. A 7. szelvény az 1. szelvényhez képest 20° -os szöveget zárt be.

A szelvényhálózat kitűzéséhez lokális geodéziai hálózat készült, amelyet később az EOV rendszerbe illesztettünk. Ennek jelentősége abból is látszik, hogy egy 355 m hosszú szelvény esetében már 1° irányhiba is több mint 6 m helyzeti eltérést eredményezhet a végpontban, ami a háromdimenziós értelmezést érdemben torzíthatja. A topográfiai adatokat optikai szintezéssel határoztuk meg. A kijelölt vonalak párhuzamosságát, merőlegességét és a köztük lévő

távolságokat ellenőrző mérések is igazolták. Az X, Y és Z koordináták felhasználásával a Surfer szoftverben natural neighbor interpolációval topográfiai modellt készítettünk. A 468 mért pontból előállított domborzati modellt a 2. ábrán látható.

3. Módszertan

3.1. Geoelektromos mérések és 2D inverziós feldolgozás

A hulladéktest és a lehetséges szennyezett zónák roncsolásmentes vizsgálatához fajlagos ellenállás- és gerjesztett polarizációs méréseket együttesen alkalmaztunk. A hét kijelölt szelvény mentén a mérések IRIS SYSCAL PRO műszerrel készültek. A mérőrendszer a terítés közepén helyezkedett el, a szelvények mentén pedig több kábeldobhosszúságú multielektrodás kábel és elektróda volt telepítve. A mérések Wenner-elrendezéssel, 5 m elektródátávolsággal zajlottak. A multielektrodás mérési eljárás során a műszer mindig négy elektródát választott ki, két áramelektródát és két potenciálektródát. A látszólagos fajlagos ellenállás és a látszólagos gerjesztett polarizációs értékek az elektródák által lefedett térrész összegzett válaszát reprezentálják. Az alkalmazott geometriában a legsekélyebb vizsgálati szint mintegy 2,6 m mélységnek adódott, míg a legnagyobb számított mélység megközelítőleg 41,5 m volt. A szelvények szélein a mélyebb tartományok vizsgálata korlátozottabb maradt. A közút és a vasút jelenléte néhány irányban az elektródák további telepítését fizikailag is akadályozta.

Az adatokat előzetesen a Prosys II szoftverrel ellenőriztük. A hibás méréseket részben a nyers adatok numerikus ellenőrzésével, részben pedig azok geometriahelyes táblázatos megjelenítésével szűrtük ki. A negatív vagy egyértelműen irreális GP értékeket, valamint a környezetükkel

nem összeegyeztethető kiugró adatokat eltávolítottuk. A hibák elsősorban a felszínközeli és a legmélyebb vizsgálati szinteken jelentkeztek, ami részben a száraz nyári talajállapottal, részben a mérési geometria korlátaival magyarázható. Az előszűrés után a hét szelvényből összesen 3835 mérési pont maradt további feldolgozásra.

A multielektrodás geoelektromos mérések és a GP együttes alkalmazása hulladéklerakó környezetben nemzetközi szinten is bevett megközelítés, mivel az ellenállás- adatok elsősorban a vezetőképességi kontrasztokat, míg a polarizációs paraméterek a hulladékösszetételhez, az oldott ionokhoz és a biogeokémiai aktivitáshoz kapcsolódó különbségeket hangsúlyozhatják (Cardarelli és Di Filippo 2004, De Carlo et al. 2013, Mepaiyeda et al. 2019, Chao et al. 2024).

A hét mérési szelvény inverziós feldolgozását a RES2DINV szoftverrel végeztük el. Az eljárás célja a látzólagos fajlagos ellenállás- és GP-adatokból a mélység-helyes, kétdimenziós fajlagos ellenállás- és tölthetőségi modellek előállítását volt. A szoftver simított Gauss–Newton-féle legkisebb négyzetek inverziós eljárást alkalmaz (Sasaki 1992). Az inverzió során az algoritmus iteratív módon olyan modellt keres, amelynek előremodellezett válasza a lehető legjobban közelíti a mért adatokat. Az illesztés jóságát az RMS-hiba jellemzi.

A feldolgozás során az elektrodákhoz rendelt topográfiai adatokat is figyelembe vettük. Az inverzió eredményeként a hét szelvény együttesen 9863 számított térbeli pontot szolgáltatott. Az inverziós modellek vízszintes értelemben sűrűbb ponthálót adtak, mint a nyers mérési elrendezés, ugyanakkor a szoftver által a szelvényvégek mentén megjelenített extrapolált zónák értelmezése csak kellő óvatossággal fogadható el.

3.2. A 2D szelvények térbeli integrálása

A hét különálló 2D-s szelvény önmagában is alkalmas a főbb anomáliák azonosítására, a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák térbeli kiterjedésének áttekintéséhez azonban szükségessé vált a szelvények közös, háromdimenziós rendszerbe történő illesztése. Az inverzió után rendelkezésre álló pontokhoz az abszolút helyzet meghatározásához a vízszintes EOV-koordináták, valamint a magassági adatokat is hozzárendeltük. A számítá-

sok áttekinthetősége érdekében először egy helyi vízszintes koordináta-rendszer alakítottunk ki. Az 1. szelvény jelölte ki a főirányt, ehhez viszonyítva a párhuzamos és merőleges szelvények pontjainak helyzete egyszerű geometriai összefüggések alapján volt meghatározható. A 7. szelvény, valamint a további térbeli pontok helyzetének számításához az alsógeodéziában általánosan alkalmazott koordinátaszámítási eljárásokat használtuk. A helyi rendszerből az EOV-rendszerbe történő áttérés eltolással és forgatással történt. Ennek eredményeként a hét szelvény összes inverziós pontját közös térbeli koordináta-rendszerbe illesztettük.

3.3. Aljzat- és vastagságtérképek előállítása

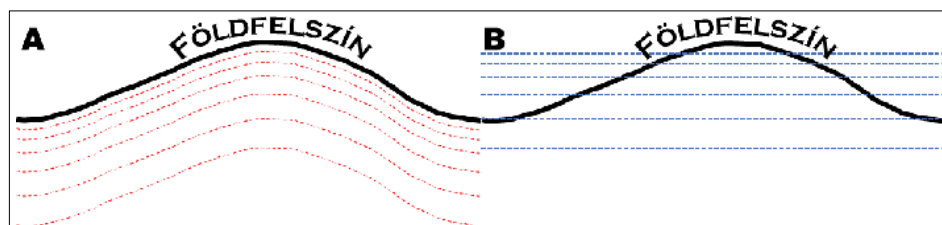
A következő lépésben a hulladéktest, illetve a potenciálisan szennyezett zónák alsó határfelületét becsültük meg. A hulladéktest alsó határát a fajlagos ellenállást bemutató modellek alapján határoztuk meg. Az alsó határ meghatározásához minden vízszintes szelvénypontnál az utolsó, még 30 Ω m alatti értéket és az alatta elhelyezkedő, már nagyobb fajlagos ellenállású pontot választottuk ki. A két pont között lineáris interpolációval számítottuk a feltételezett határfelület helyzetét.

A potenciálisan szennyezett zónák alsó határának becsülése hasonló módon történt, ezúttal a GP-adatok alapján. A 10 mV/V feletti tölthetőségi értékekkel jelöltük ki a potenciálisan szennyezett tartományt. A felszín és az alsó határfelületek különbsége alapján vastagságtérképek is készültek.

3.4. Horizontális szeletek előállítása

A több szelvényből álló mérési hálózatból horizontális eloszlástérképeket is szerkesztettünk. Sík felszín esetén az azonos inverziós szintekhez tartozó pontok közel azonos vízszintes síkban helyezkednek el. Ezért ezek egyszerűen összevonhatók horizontális térképek készítéséhez. Változékony topográfia esetén azonban az azonos sorszámú mélységi pontok már nem ugyanabban a vízszintes síkban találhatók, így az ezekből készített térképek különböző mélységből származó információkat tartalmaznak.

A jelenséget a 3. ábra szemlélteti. Az ábra A részén a geoelektromos mérésekből számított paraméterpontok



3. ábra A topográfia hatása a horizontális szeletek meghatározására: (A) a geoelektromos mérésekből számított paraméterpontok elhelyezkedése változékony felszín alatt; (B) az alkalmazott szeletelési algoritmus által meghatározott horizontális síkok

Figure 3 Effect of topography on horizontal slicing: (A) distribution of calculated geoelectrical parameter points beneath a variable surface; (B) horizontal planes defined by the proposed slicing algorithm

helyzete látható változó felszín alatt. Ilyen esetben az azonos sorszámú mélységi pontok nem egyetlen vízszintes síkba esnek. Ha ezekből közvetlenül készítünk horizontális interpolációt, akkor az eredmény egy olyan térkép lesz, amely eltérő mélységek információit keveri. A probléma az orvosi képalkotáshoz is hasonlítható: a számítógépes tomográfia (CT) sem a test külső felszínéhez igazítva készíti a szeleteket, hanem azonos mélységű síkok mentén.

A topográfia hatásának jellemzésére az alábbi feltételt vettük figyelembe:

$$5r \geq Z_{\max} - Z_{\min} \geq r/2, \quad (1)$$

ahol r a használt elektródátávolság, Z_{\max} és Z_{\min} pedig a vizsgált terület legnagyobb és legkisebb felszínmagassága. A probléma kezelésére egy egyszerűsített szeletelési eljárást alkalmaztunk, amely a horizontális síkok mélységét az elektródátávolság és az inverziós pontok várható sűrűsége alapján határozza meg:

$$H(i) = \frac{r}{100}(i-1)(i+4), \quad (2)$$

ahol $H(i)$ a horizontális szelet mélysége a legmagasabb felszíni ponttól mérve, i a szelet sorszáma, r pedig az elektródátávolság.

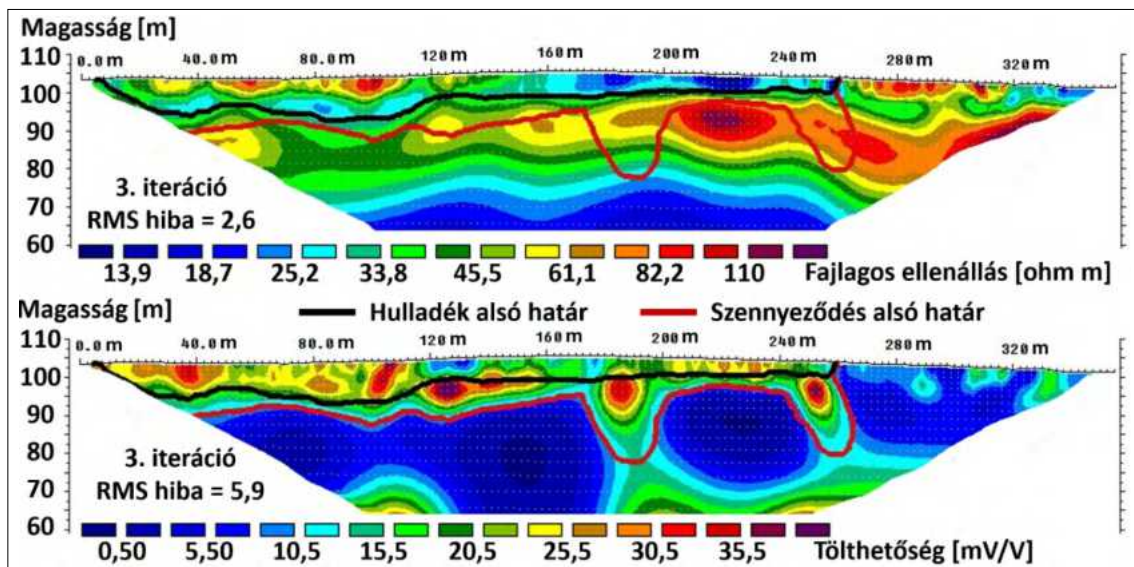
A módszer eredménye a 3. ábra B részén látható. Az alkalmazott szeletelési eljárás célja nem pusztán geometriai transzformáció, hanem annak biztosítása, hogy az interpolált térképek valóban azonos fizikai mélységtartományból származó információt reprezentáljanak. Az 5 m-es elektródátávolság mellett a vizsgált terület esetében 29 horizontális szeletet jelöltünk ki. A horizontális szeletek fajlagos ellenállás- és GP-térképeit interpolációval készítettük el. A

több szelvényből felépített térbeli értelmezés és a horizontális szeletek alkalmazása összhangban áll azokkal a nemzetközi vizsgálatokkal, amelyek szerint a lerakótestek és csurgaléközónák leírásában a 2D és 3D szemlélet kombinálása lényegesen több információt ad, mint az egymástól függetlenül értelmezett egyedi szelvények (Maurya et al. 2017, Martorana et al. 2023).

A számított térbeli pontokat a hozzájuk legközelebb eső szeletmélységhez rendeltük, így minden pontot egyértelműen egy adott horizontális szinthez rendeltük hozzá. Ez biztosítja, hogy a szeletek információtartalma nem kever különböző mélységű adatokat. A szeletelési eljárás hatásának kvantitatív értékelése érdekében az eredeti és a topográfia-korrigált szeletelési rendszer összehasonlítását végeztük el. Mivel a két rendszer eltérő számú szelet szintet tartalmaz, a rétegindexeket normalizáltuk, ahol a legfelső szelet a 0, a legmélyebb pedig az 1 értéket kapta, a köztes szinteket pedig arányosan határoztuk meg. Ezt követően pontonként meghatároztuk a két rendszerben elfoglalt relatív vertikális pozíciók eltérését, amelyet az eredeti rendszer rétegeiben fejeztünk ki. Ez lehetővé teszi a különböző felbontású szeletelési rendszerek közvetlen összehasonlítását anélkül, hogy azok egyértelmű megfeleltetése szükséges lenne.

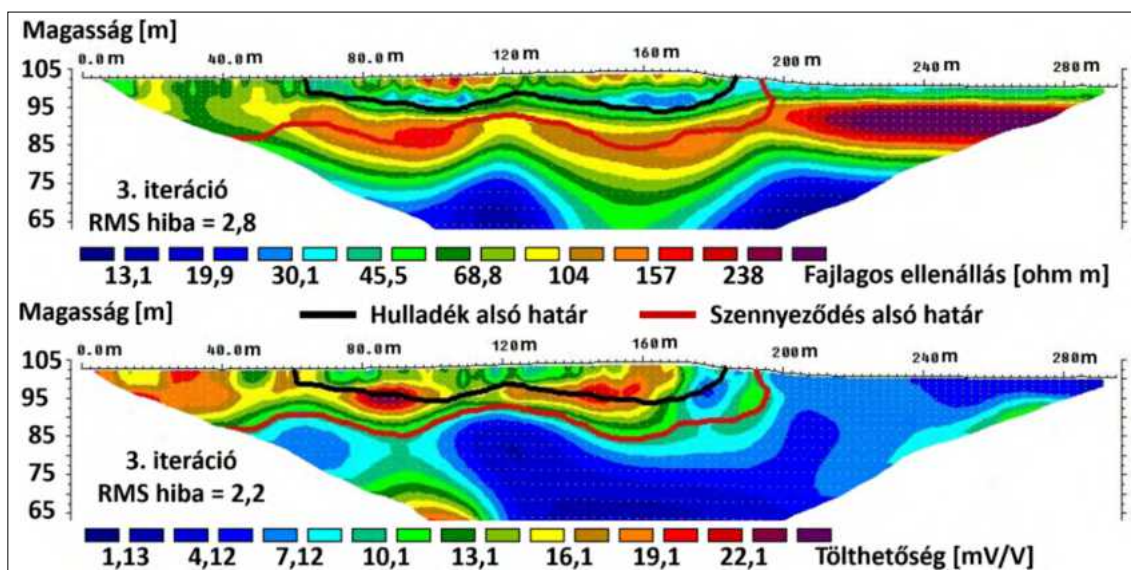
4. Eredmények

Az inverziós szelvények értelmezésénél a hulladéktestet alacsony fajlagos ellenállású zónák jeleztek, míg a szennymentes kavicsos rétegek jellemzően magasabb fajlagos ellenállással jelentek meg. A korábbi földtani ismeretek szerint a hulladékot egy egykori kavicsbánya mé-



4. ábra | Az 1. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli

Figure 4 | Inversion model of section 1. Resistivity distribution (top) and induced polarization chargeability (bottom). The black line marks the estimated base of the waste body, while the red line indicates the inferred lower boundary of the potentially contaminated zone



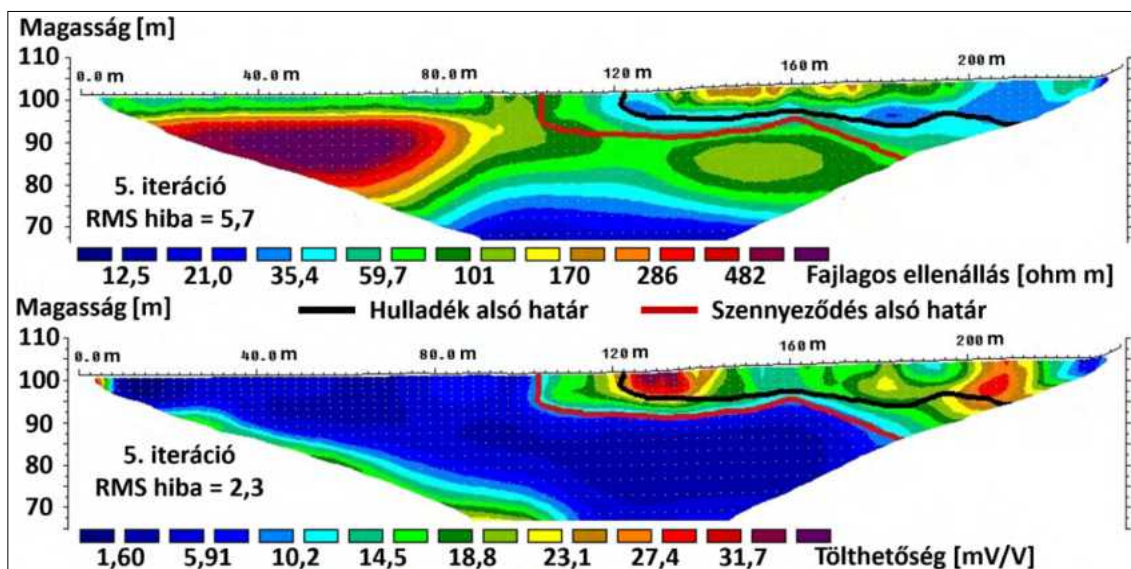
5. ábra A 4. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becslült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli

Figure 5 Inversion model of section 4. Resistivity distribution (top) and induced polarization chargeability (bottom). The black line marks the estimated base of the waste body, while the red line indicates the inferred lower boundary of the potentially contaminated zone

lyedésében helyezték el, amely alatt vízzáró agyagos összlet található. A GP szelvényeken a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák rendszerint emelkedett tölthetőségi értékekkel jelentkeztek. Az értelmezés során a 30 Ωm alatti fajlagos ellenállású tartomány a hulladéktest feltételezett határaként, míg a 10 mV/V feletti tölthetőség a potenciálisan szennyezett zónák jelölésére szolgált. Ezek a határértékek értelmezési segédletként kerültek alkalmazásra, nem pedig abszolút geológiai határként.

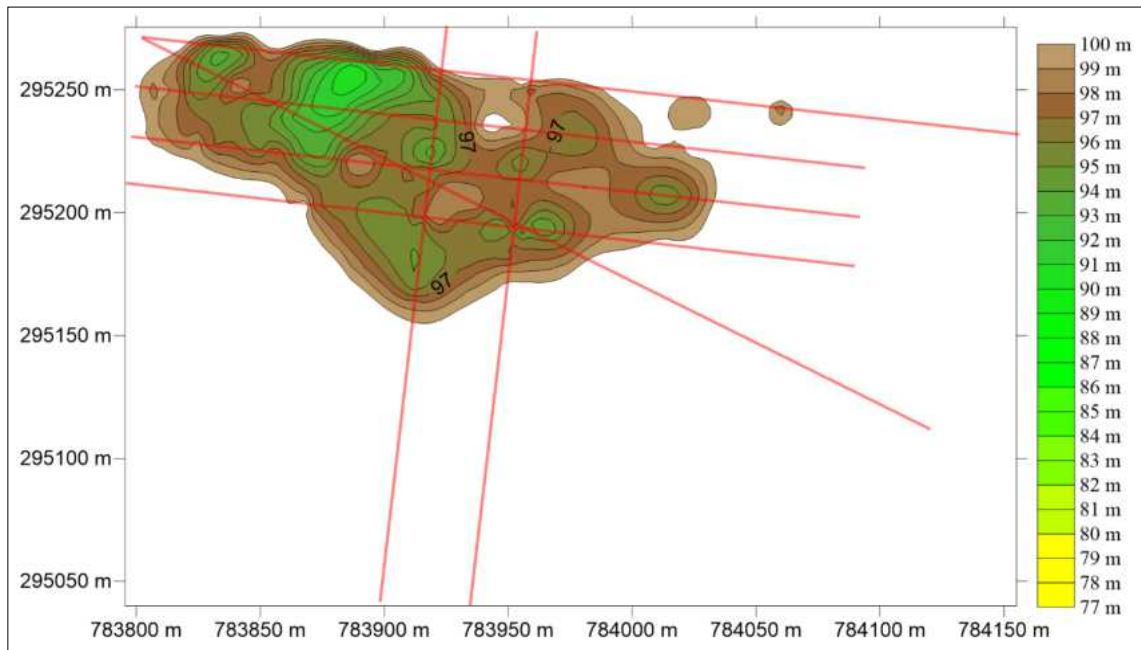
Az 1. szelvényen (4. ábra) a hulladéktestet mintegy 260 m hosszan azonosítottuk, jellemzően 5–12 m vastagságban. A magasabb tölthetőségi értékek e zóna alatt helyenként 15 m mélységig, lokálisan akár 20 m-ig is, követhetők voltak.

A 4. szelvény (5. ábra) alapján a hulladéktest keleti irányban fokozatosan elvékonyodott és horizontális kiterjedése csökkent. A keleti oldalon ugyanakkor továbbra is kiterjedtebb, emelkedett tölthetőségű tartomány jelentkezett.



6. ábra A 6. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becslült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli

Figure 6 Inversion model of section 6. Resistivity distribution (top) and induced polarization chargeability (bottom). The black line marks the estimated base of the waste body, while the red line indicates the inferred lower boundary of the potentially contaminated zone

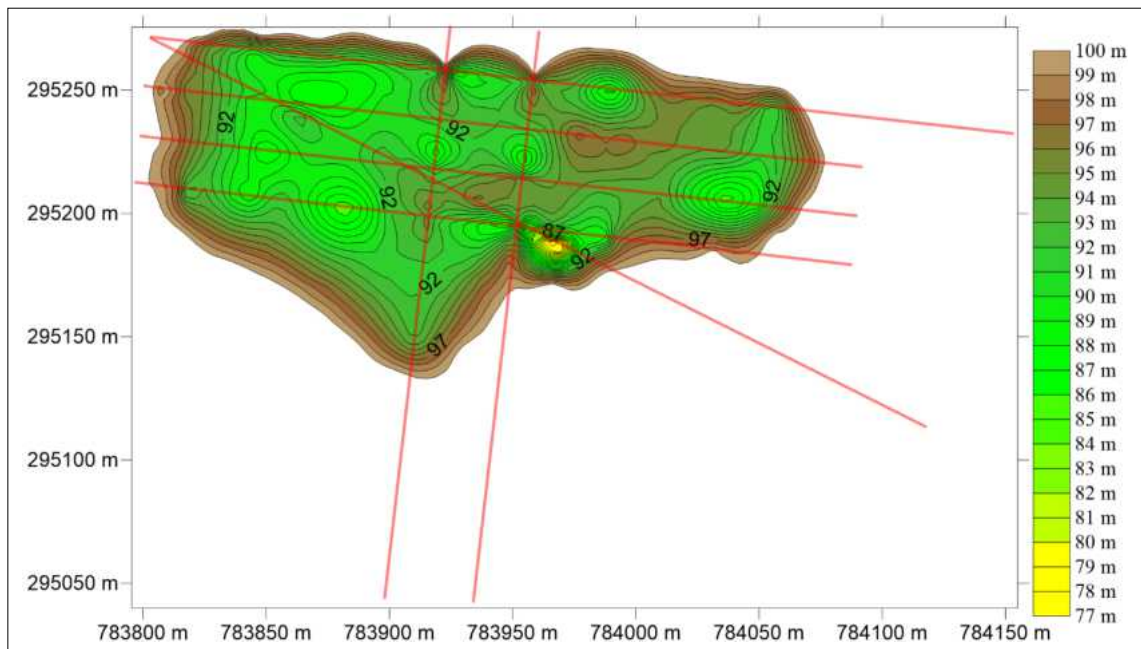


7. ábra | A hulladéktest becsült alsó határának izovonalas térképe [mBf]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják

Figure 7 | Isoline map of the estimated base of the waste body [m above Baltic Sea level]. Red lines indicate the positions of the geoelectrical survey profiles

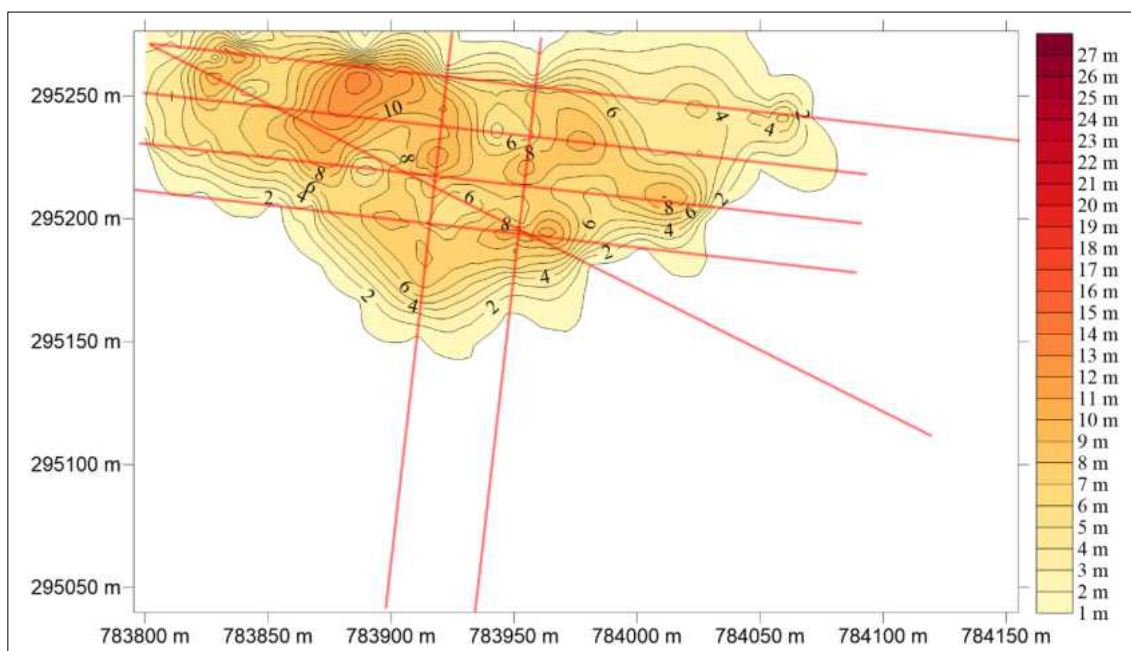
Az 5. és 6. keresztmetszvények (6. ábra) megerősítették, hogy a hulladéktest a főút irányába is folytatódhat, bár ebben az irányban a mérési terítés a fizikai akadályok miatt korlátozott volt. Mindkét szelvényen a hulladéktest alatti és oldalsó zónákban is emelkedett GP-értékek jelentkez-

tek. A 7. átlós szelvényen a hulladéktest különösen egyértelműen jelent meg; az első mintegy 190 m-en összefüggő, alacsony fajlagos ellenállású test volt azonosítható, amelyhez mélyebb és oldalirányú, emelkedett töltheségű nyúlványok kapcsolódtak.



8. ábra | A potenciálisan szennyezett zóna becsült alsó határának izovonalas térképe [mBf]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják

Figure 8 | Isoline map of the estimated lower boundary of the potentially contaminated zone [m above Baltic Sea level]. Red lines indicate the positions of the geoelectrical survey profiles

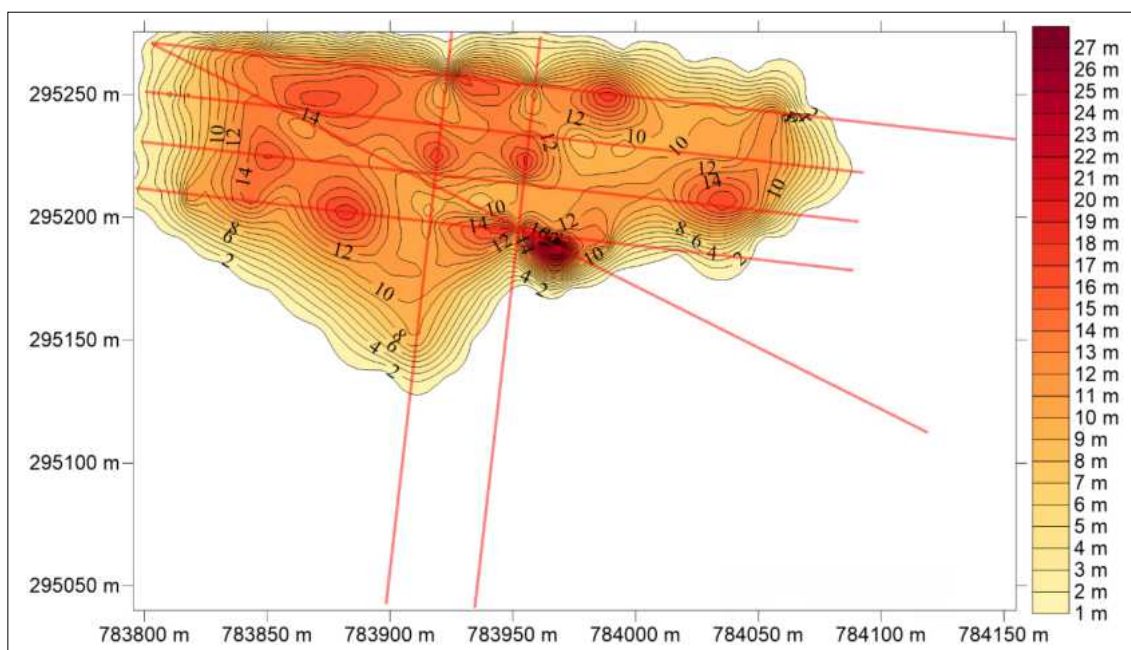


9. ábra | A hulladék réteg becslt vastagságának izovonalas térképe [m]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják

Figure 9 | Isoline map of the estimated thickness of the waste layer [m]. Red lines indicate the positions of the geoelectrical survey profiles

A szelvények együttes értelmezése alapján a hulladéktest térbeli kiterjedése és vastagságváltozása jól követhető volt. Emellett több olyan zóna is elkülöníthetővé vált, ahol az emelkedett GP-értékek a hulladéktest alatti vagy oldal-só, potenciálisan szennyezett térrészekre utalhatnak.

A hulladéktest alsó határát bemutató térkép (7. ábra) alapján az aljzathatár jellemzően 94–96 mBf magasságban helyezkedik el, lokálisan azonban ennél mélyebb, mintegy 91 mBf körüli értékek is előfordulnak.



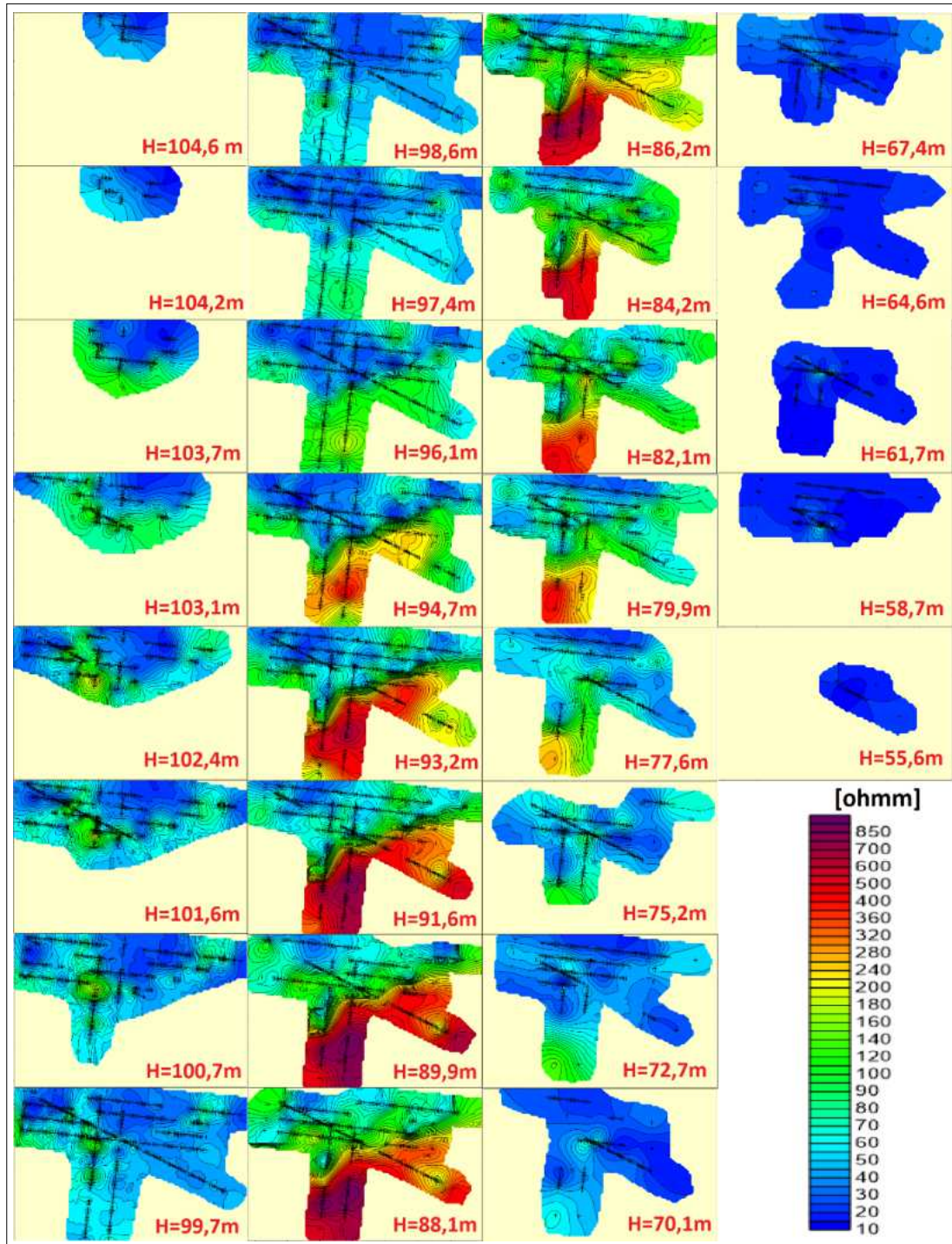
10. ábra | A potenciálisan szennyezett zóna becslt vastagságának izovonalas térképe [m]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják

Figure 10 | Isoline map of the estimated thickness of the potentially contaminated zone [m]. Red lines indicate the positions of the geoelectrical survey profiles

A potenciálisan szennyezett zónák alsó határfelülete (8. *ábra*) alapján az emelkedett polarizálhatóságú zónák térbeli kiterjedése a hulladéktesthez képest oldalirányban és mélységben is nagyobb lehet. A potenciálisan szennyezettnek zónaként értelmezett tartomány alsó határa jellemzően 88–92 mBf között helyezkedik el. Egy lokális mélyebb anomália mintegy 77 mBf körüli értéket is jelez, ennek valószínű földtani jelentése azonban a szomszédos szelvények korlátozott megerősítése miatt bizonytalan.

A hulladék réteg átlagos vastagsága 4–8 m, lokálisan azonban elérheti a 13 m-t is (9. *ábra*). A peremi, 1–2 m vastagságú részek megbízhatósága kisebb, mivel ezek közel esnek a mérési és értelmezési kimutathatósági határhoz.

Amennyiben a GP-adatokból kijelölt, emelkedett töltetességű térrészeket is figyelembe vesszük, a teljes érintett zóna vastagsága a vizsgált területen többnyire 10–15 m közé esik (10. *ábra*).

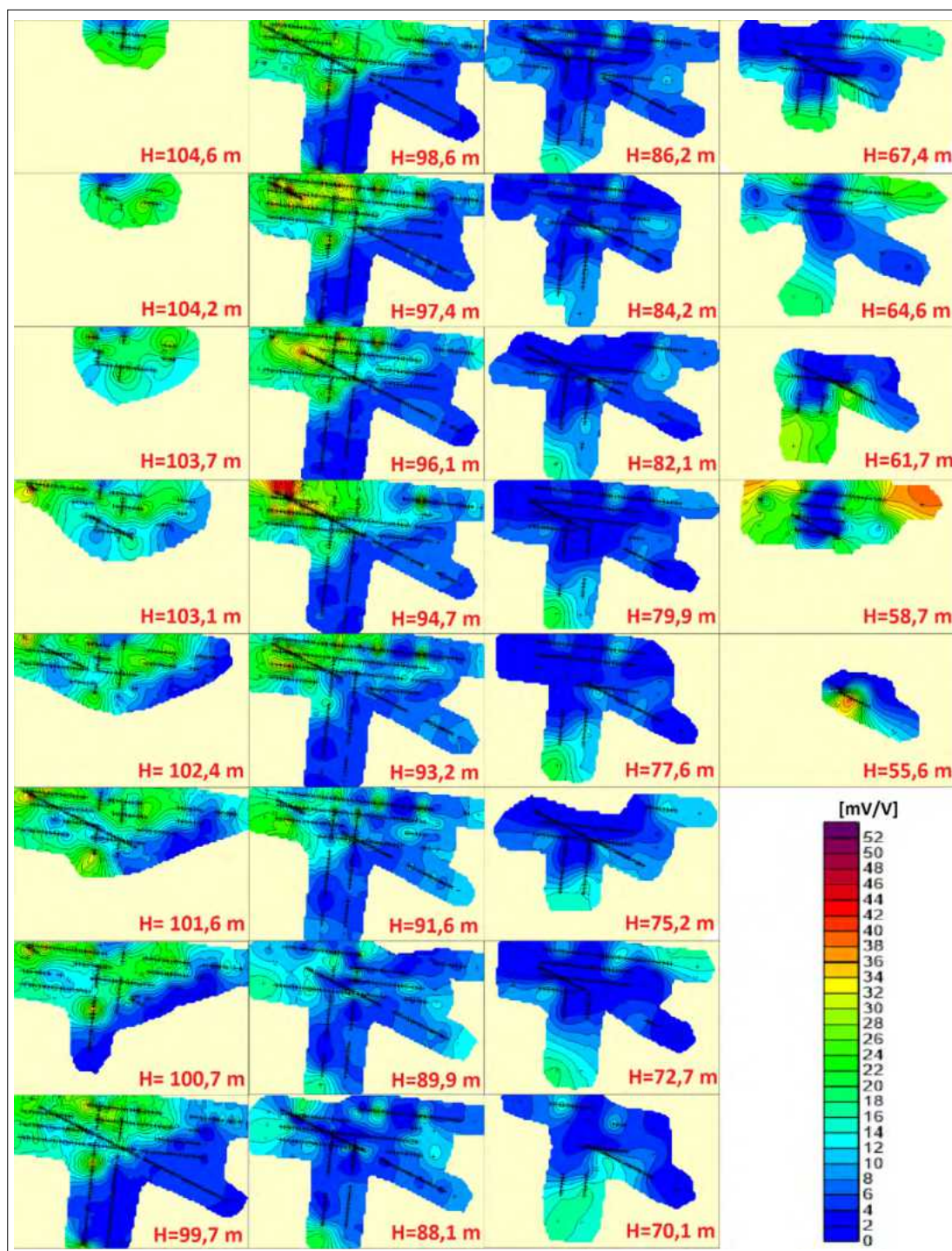


11. *ábra* | A fajlagos ellenállás horizontális eloszlástérképei különböző magassági szinteken
 Figure 11 | Horizontal resistivity maps at different elevation levels

A vastagságtérképek alapján térfogatbecslést is végeztünk. A hulladéktest becslült térfogata mintegy $127\,000\text{ m}^3$, míg a hulladéktestet, a fedőréteget és a potenciálisan szennyezett alsó térrészeket együttesen figyelembe vevő térfogat közel $266\,000\text{ m}^3$. Ezek az értékek geofizikai alapú közelítéseknek tekintendők, amelyek pontossága a felhasznált határértékek, az inverziós modellek felbontása, valamint a mérési geometria korlátai miatt bizonytalanságot

hordoz. A térfogatbecslés bizonytalanságot hordoz, azonban nagyságrendi szinten jól jellemzi a hulladéktest kiterjedését, és alkalmas összehasonlító vizsgálatokra.

A fajlagos ellenállást bemutató horizontális szeleteken (11. ábra) a felszínközeli szinteken összefüggő, alacsony ellenállású zóna jelenik meg, amely a hulladéktest feltételezett helyzetével hozható összefüggésbe. Mélyebb szinteken ez a zóna fokozatosan feldarabolódik, majd eltűnik.



12. ábra | A gerjesztett polarizáció töltheségi horizontális eloszlástérképei különböző magassági szinteken
Figure 12 | Horizontal chargeability maps of induced polarization at different elevation levels

A GP-szeleteken a felsőbb szinteken összefüggő, emelkedett tölthetőségű zóna jelenik meg a hulladéktest térségében, amely később foltszerűvé válik, de egyes mélységi szinteken még a 12. ábra alapján is követhető.

A horizontális szeletelési eljárás hatásának kvantitatív értékelése érdekében a hagyományos és a topográfia-korrigált szeletelési módszer közötti eltéréseket vizsgáltuk. Az összehasonlítás során a pontok normalizált szeletpozíciójának különbségét vettük alapul, amely a két rendszer közötti relatív vertikális átrendeződést jellemzi. A vizsgált területen az átlagos eltérés 1,17 rétegnek, a medián 0,86 rétegnek, a szórás 0,96 rétegnek, míg a maximális eltérés 4,14 rétegnek adódott. A pontok többsége csak kis mértékben változtatja meg a szeletbeli pozícióját, ugyanakkor lokálisan jelentős eltérések is előfordulnak. Ezek elsősorban a nagyobb topográfiai különbségekkel jellemezhető területrészekhez köthetők.

A hagyományos szeletelési eljárás bizonyos esetekben eltérő mélységtartományokhoz tartozó pontokat rendelhet azonos horizontális szintekhez, ami torzíthatja a térbeli értelmezést. A topográfia-korrigált szeletelési módszer ezzel szemben képes ezen eltérések mérséklésére, miközben a pontok többségénél nem okoz jelentős mesterséges átrendeződést. Megállapítható, hogy a szeletelési algoritmus nem torzíthatja az adatrendszer, hanem javítja annak geometriai konzisztenciáját, és különösen a változó topográfiaú területeken biztosít megbízhatóbb és fizikailag értelmezhetőbb horizontális leképezést.

5. Az eredmények értékelése

A nyékládházi rekultivált hulladéklerakó területén végzett geofizikai felmérés részletes képet adott a felszín alatti szerkezetről és a hulladéktest feltételezett térbeli kiterjedéséről. A multielektrodás geoelektromos mérés és a gerjesztett polarizáció együttes alkalmazása lehetővé tette a különböző közetfizikai jelenségek összevetését. Ennek eredményeként a hulladéktesthez és a potenciálisan szennyezett zónákhoz kapcsolható anomáliák értelmezése megbízhatóbbá vált.

A kapott eredmények jól illeszkednek a hulladéklerakók geofizikai vizsgálatának szakirodalmi tapasztalataihoz. A nemzetközi esettanulmányok szerint az alacsony ellenállású zónák gyakran a hulladéktesthez vagy a csurgalékkal érintett térrészekhez kapcsolódnak, míg a GP-adatok sok esetben finomabban különítik el a lerakó alját, a hulladék-összetétel különbségeit, valamint a biogeokémiailag aktív zónákat (Bernstone et al. 2000, Chambers et al. 2006, Flores-Orozco et al. 2020, Chao et al. 2024). A szakirodalom ugyanakkor azt is hangsúlyozza, hogy az ilyen geofizikai anomáliák értelmezése önmagában nem tekinthető közvetlen geokémiai bizonyításnak, hanem leginkább valószínűsíthető térbeli mintázatot ad, amelyet lehetőség szerint egyéb ellenőrző adatokkal célszerű megerősíteni (De Carlo et al. 2013, Guinea et al. 2022).

A jelen tudományos munka egyik fontos módszertani hozadéka, hogy teljes 3D inverzió alkalmazása nélkül, több precízen kitűzött 2D szelvényből sikerült közös térbeli értelmezési rendszert kialakítani. Az ilyen jellegű felmérési elrendezés lehetővé teszi, hogy a különálló 2D inverziós modelleket egységes térbeli keretben értelmezhesük, ami különösen hasznos heterogén szerkezetű környezeti objektumok, például hulladéklerakók vizsgálatánál. Ez a megközelítés különösen olyan területeken lehet előnyös, ahol a felszíni infrastruktúra vagy a domborzati viszonyok nem teszik lehetővé szabályos 3D elektródaháló telepítését. A közelmúltban megjelent háromdimenziós geofizikai alkalmazások szintén arra utalnak, hogy az elektródaelrendezés rugalmassága és a térbeli integráció kulcskérdés az ilyen vizsgálatoknál (Maurya et al. 2017, Martorana et al. 2023).

A bemutatott horizontális szeletelési eljárás gyakorlati átmenetet jelent az egyedi 2D szelvények értelmezése és a teljes 3D modellalkotás között. Változatos topográfia esetén az azonos sorszámú inverziós pontok gyakran eltérő magassági szinteken helyezkednek el, ami megnehezíti az azonos mélységre vonatkozó térképek előállítását. Az alkalmazott szeletelési eljárás ezt a problémát azáltal kezeli, hogy a horizontális síkok mélységét a mérési geometria és az elektródatávolság figyelembevételével határozza meg. Ez nemcsak a különböző szelvényekből származó adatok összehasonlíthatóságát biztosítja, hanem csökkenti a különböző mélységekhez tartozó információk keveredéséből adódó értelmezési bizonytalanságot is.

A módszer hatásának kvantitatív értékelése során a hagyományos, azonos sorszámú inverziós szinteken alapuló szeletelést és a topográfia-korrigált eljárást összehasonlítottuk a pontok normalizált szeletpozíciójának különbsége alapján. A kvantitatív összehasonlítás alapján a pontok többsége csak kis mértékű, átlagosan mintegy egy rétegnyi eltérést mutatott ($\approx 1,17$), ugyanakkor lokálisan ennél lényegesen nagyobb különbségek is előfordultak. A pontok többsége csak kis mértékben változtatja meg a szeletbeli pozícióját, ugyanakkor lokálisan jelentős eltérések is előfordulnak, amelyek elsősorban a nagyobb topográfiai különbségekkel jellemezhető területrészekhez köthetők.

Ez a kettősség arra utal, hogy a hagyományos szeletelési megközelítés bizonyos esetekben eltérő mélységtartományokhoz tartozó pontokat rendelhet azonos horizontális szintekhez, ami torzíthatja a térbeli értelmezést. A topográfia-korrigált szeletelési módszer ezzel szemben képes ezen eltérések mérséklésére, miközben nem okoz jelentős mesterséges átrendeződést az adatrendszerben. Ennek következtében a horizontális szeletek fizikai jelentése egyértelműbbé válik, és valóban azonos mélységi szinteket reprezentálnak.

Az eredmények értelmezésénél ugyanakkor több korlátozó tényezőt is figyelembe kell venni. A közút és a vasút jelenléte korlátozta az elektródák telepítését és ezzel együtt a mérési terület lefedettségét is. A szelvényvégek mentén, valamint a ritkább adatlefedettségű térségekben az interpoláció és az inverzió bizonytalansága nagyobb lehet.

Emellett a GP-anomáliák értelmezése önmagában nem tekinthető közvetlen bizonyítéknak a szennyezettségre, hanem olyan indikátornak, amelyet lehetőség szerint más földtani, hidrogeológiai vagy geokémiai adatokkal célszerű alátámasztani.

A bemutatott szeletelési eljárás hatékonyan javítja a multielektrodás geoelektromos adatok térbeli értelmezhetőségét, különösen változékony topográfiajú területeken. A módszer hozzájárul a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák pontosabb lehatárolásához, és jól integrálható a többparaméteres statisztikai értelmezési eljárásokkal.

További vizsgálatok szükségesek annak meghatározására, hogy a horizontális szeletelési megközelítés milyen terepi geometriák és topográfiai viszonyok mellett ad valódi többletinformációt, illetve milyen esetekben célszerű közvetlen 3D mérési és inverziós stratégiát alkalmazni. A jövőbeni kutatások egyik iránya lehet a jelen adatállomány teljes 3D inverziója, majd annak összevetése a jelen munkában alkalmazott 2D szelvényekből felépített térbeli modellel.

6. Következtetések

A multielektrodás geoelektromos mérések és a gerjesztett polarizáció integrált alkalmazása a vizsgált területen alkalmasnak bizonyult egy rekultivált hulladéklerakó térbeli szerkezetének és a hozzá kapcsolódó potenciálisan szennyezett zónák lehatárolására. A rendezett geometriájú szelvényhálózat, a precíz geodéziai előkészítés és a topográfiai adatok figyelembevétele lehetővé tette a 2D inverziós eredmények közös térbeli értelmezését.

A feldolgozott adatok alapján a hulladéktréteg becsült vastagsága átlagosan 4–8 m, lokálisan mintegy 13 m, míg a geofizikai anomáliákkal jellemzett teljes érintett zóna vastagsága többnyire 10–15 m. A térfogatszámítások szerint a hulladéktest térfogata közelítőleg 127 000 m³, míg a teljes érintett térrészé mintegy 266 000 m³. A fajlagosellenállásmodellek alapján a hulladéktest helyzete jól követhető volt, míg a gerjesztett polarizáció több olyan zónát is kijelölt, amelyek a hulladéktest alatti vagy oldalsó, potenciálisan szennyezett térrészekre utalnak.

A tanulmány egyik legfontosabb módszertani eredménye a topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelési eljárás alkalmazása és kvantitatív értékelése. A hagyományos és a korrigált szeletelési módszerek összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a pontok többsége csak kis mértékben rendeződik át, ugyanakkor lokálisan több rétegnyi eltérés is jelentkezhet. Ez igazolja, hogy a hagyományos szeletelés változékony topográfia esetén torzíthatja a térbeli értelmezést, míg a bemutatott eljárás képes ezen hatások mérséklésére, és fizikailag konzisztensebb horizontális leképezést biztosít.

Több, megfelelően elrendezett 2D geoelektromos szelvény integrálásával és topográfia-korrigált szeletelés alkalmazásával a teljes 3D inverzióhoz hasonló értelmezési szint

lényegesen kisebb terepi és számítási ráfordítás mellett közelíthető. Ez különösen olyan területeken jelent előnyt, ahol a terepi adottságok nem teszik lehetővé szabályos 3D elektrodaháló kialakítását. A bemutatott megközelítés nemcsak a vizsgált területre alkalmazható, hanem általánosan is használható minden olyan környezetföldtani vizsgálatban, ahol a topográfia jelentős hatással van a geoelektromos adatok térbeli értelmezésére. A módszer hozzájárulhat a szennyezett területek pontosabb lehatárolásához és az interpretációs bizonytalanság csökkentéséhez. A kapott eredmények ugyanakkor továbbra is geofizikai alapú becsléseknek tekintendők. A módszer megbízhatósága további közvetlen földtani, hidrogeológiai vagy geokémiai ellenőrző adatokkal növelhető. A jövőbeni kutatások egyik iránya lehet a teljes 3D inverzióval történő összehasonlítás, valamint a szeletelési eljárás alkalmazhatóságának vizsgálata különböző topográfiai és mérési geometriák esetén.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton fejezzük ki köszönetünket dr. habil. Turai Endrének, aki részt vett a terepi mérésekben és az adatfeldolgozásokban egyaránt, és nagyfokú szakmai iránymutatásával segítette a tanulmány elkészülését. Neve eredetileg szerzőként is szerepelt volna a cikkben, annak végleges összeállítását azonban sajnos már nem élhette meg, tekintettel arra, hogy 2025. május 14-én elhunyt.

A tanulmány szerzői

Szilvási Marcell, Havasi István

Hivatkozások

- Bernstone C., Dahlin T., Ohlsson T., Hogland W. (2000): DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys. *Environmental Geology*, 39(3–4), 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>
- Cardarelli E., Di Filippo G. (2004): Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterize an urban waste dump (four case studies in Italy). *Waste Management & Research*, 22(5), 390–402. <https://doi.org/10.1177/0734242X04046042>
- Chambers J. E., Kuras O., Meldrum P. I., Ogilvy R. D., Hollands J. (2006): Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71(6), B231–B239. <https://doi.org/10.1190/1.2360184>
- Chao C., Ma X., Liu S., Zheng C., Mao D. (2024): Characterization of solid waste deposit using electrical resistivity tomography and time-domain induced polarization. *Journal of Environmental Management*, 366, 121854. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121854>
- De Carlo L., Perri M. T., Caputo M. C., Deiana R., Vurro M., Cassiani G. (2013): Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Journal of Applied Geophysics*, 98, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.07.010>
- Flores-Orozco A., Gallistl J., Steiner M., Brandstätter C., Fellner J. (2020): Mapping biogeochemically active zones in landfills

- with induced polarization imaging: The Heferlbach landfill. *Waste Management*, 107, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.001>
- Gazoty A., Fiandaca G., Pedersen J., Auken E., Christiansen A. V., Pedersen J. K. (2012): Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1793–1804. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1793-2012>
- Guinea A., Bicknell J., Cox N., Swan H., Simmons N. (2022): Characterization of legacy landfills with electrical resistivity tomography: a comparative study. *Journal of Applied Geophysics*, 203, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104716>
- Gyulai Á., Baracza M. K., Szabó N. P. (2014): On the application of combined geoelectric weighted inversion in environmental exploration. *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 383–392. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2441-9>
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002): *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Publishing, Oxford. ISBN: 978-0632049295.
- Keller G. W., Frischknecht F. C. (1966): *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, Oxford. ISBN: 978-0080115252
- Martorana R., Capizzi P., Pirrera C. (2023): Unconventional arrays for 3D electrical resistivity and induced polarization tomography to detect leachate concentration in a waste landfill. *Applied Sciences*, 13(12), 7203.
- Maurya P. K., Ronde V. K., Fiandaca G., Balbarini N., Auken E., Bjerg P. L., Christiansen A. V. (2017): Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography – with correlation to ionic strength measured in screens. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.019>
- Mepaiyeda S., Madi K., Gwavava O., Baiyegunhi C., Sigabi L. (2019): Contaminant delineation of a landfill site using electrical resistivity and induced polarization methods in Alice, Eastern Cape, South Africa. *International Journal of Geophysics*, Article ID 5057832. <https://doi.org/10.1155/2019/5057832>
- Pappné Molnár Zs., Török I. (1997): *Kommunális hulladéklerakók vizsgálata geofizikai módszerekkel*. Miskolci Egyetem, TDK-munka.
- Sasaki Y. (1992): Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453–464. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1992.tb00536.x>
- Sumner J. S. (1976): *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. ISBN: 0-444-41481-9
- Szilvási M., Turai E. (2018): *Geodéziai alapok kialakítása egy rekultivált hulladéklerakó geofizikai felméréséhez és kiértékeléséhez*. LVII. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere, 55–61.
- Tóth Á., Szabó N. P. (1999): *Kommunális hulladéklerakó geofizikai vizsgálata*. Miskolci Egyetem, TDK-munka.
- Turai E. (1981): GP time-domain görbék TAU-transzformációja. *Magyar Geofizika*, 22(1), 29–36. ISSN: 0025-0120.
- Turai E., Szilvási M. (2017): *Rekultivált hulladéklerakó szennyezettségének vizsgálata*. Műszaki Földtudományi Közlemények, 181–192. ISBN: 978-963-358-310-4.
- Wait J. R. (1959): *Overvoltage Research and Geophysical Applications*. Pergamon Press, London.

Rezervoárheterogenitás hatásának numerikus vizsgálata porózus közegbe visszasajtoló kutak nyomásviszonyaira

NAGY BENCE^{1,@}, MARKÓ ÁBEL^{2,3}, GALSA ATTILA^{1,4}, MOLNÁR BENCE^{1,5}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest

²Tóth József és Erzsébet Hidrogeológia Professzúra Alapítvány, Eötvös Loránd Tudományegyetem,
Földrajz- és Földtudományi Intézet, Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék, Budapest

³Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Budapest

⁴HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

⁵MS Energy Solutions Ltd., Eger

@E-mail: nagyb@eotvos.elte.hu

A Pannon-medence termákvíz-tartó képződményei és magas hőárama kiváló lehetőséget nyújt sikeres geotermikus projektek számára, azonban a fenntartható geotermikus energiahasznosításhoz a kitermelt termákvíz visszasajtolása elengedhetetlen. Ismert tény, hogy a sziliciklasztos rezervoárba visszasajtoló kutak számos gyakorlati problémával terheltek, melyek rontják a visszasajtolás hatékonyságát. Az alacsony hatékonyságot gyakran biológiai, mechanikai vagy kémiai tényezők okozta (porus)eltömődések hatásának tulajdonítják. Mindezek azonban csak részben magyarázzák a kútban bekövetkező nyomásnövekedést. Problémafelvetésünk, hogy a sziliciklasztos víztartók rezervoár léptékű heterogenitása összemérhető kockázatot jelenthet a mikroskalájú problémákkal, mivel befolyásolja i) a rezervoár térfogatát, ii) a permeábilis zónák közötti összeköttetést, illetve iii) a geotermikus kútpár közötti kapcsolatot, ezzel jelentősen csökkentve a visszasajtolás hatékonyságát. A felvázolt probléma vizsgálatához végeselemes numerikus modellezést végeztünk, ahol a visszasajtoló kútban bekövetkező nyomásnövekedést 2D tranzienst áramlási szimulációkon keresztül tanulmányoztuk. A heterogenitás leképezéséhez sztochasztikus permeabilitáseloszlásokat generáltunk a Szekvenciális Gaussi Szimuláció (SGS) algoritmus segítségével öt különböző korrelációs hossz és három szórásnégyzet esetén. A szimulációk során nyomon követtük az idő függvényében a visszasajtoló kútban bekövetkező nyomásnövekedést, valamint a nyomásfront terjedését. Eredményeink alapján egy visszasajtoló kút jellemző élettartama alatt akár több bar nyomásnövekedés is tapasztalható, amely erősen függ a heterogenitás skálájától. Ahogy a nyomás frontja eléri az alacsonyabb permeabilitású területeket, a nyomásnövekedés üteme megnő a kútban, bizonyítva, hogy a kúttól távolabb fekvő területek is befolyásolják a visszasajtolás hatékonyságát. A nyomásnövekedés kezdeti ideje (pár nap – pár hét) általában lényegesen meghaladja egy tipikus kútteszt hosszát (2–8 óra), ami az effektív permeabilitás felülbecsléséhez vezethet. A nem megfelelő előzetes geofizikai kutatás, illetve az üledékföldtani és vízföldtani változékonyság figyelmen kívül hagyása így az injektivitás jelentős túlbecslését eredményezheti. Annak megértése, hogy a sziliciklasztos víztartók rezervoár léptékű heterogenitásának mi a szerepe a visszasajtolás hatékonyságában, illetve a részletes előzetes kutatások hozzájárulhatnak-e a visszasajtoló kutak megfelelőbb elhelyezéséhez, és ezáltal a geotermikus rendszerek hatékony működtetéséhez.

Nagy, B., Markó, Á., Galsa, A., Molnár, B.: Numerical study of pressure increase behaviour in injection wells in stochastically heterogeneous porous reservoirs

The regionally extended thermal water bearing aquifers and the high geothermal gradient of the Pannonian Basin make it a prime target for geothermal projects; however, sustainable geothermal energy production requires the reinjection of produced water. Reinjection wells in siliciclastic reservoirs encounter numerous practical problems, which reduce injectivity and endanger the project. As such there has been extensive research regarding unsuccessful injection wells, attributing many of the issues to micro/local scale biological-mechanical-chemical problems (e.g., pore-scale clogging). However, these clogging processes do not give a complete explanation for the pressure increase observed in the well itself. We hence propose that macroscale heterogeneity of siliciclastic aquifers can be an equally important risk, i) affecting the effective reservoir volume, ii) the connectivity between high permeability zones, and iii) the communication between the geothermal doublet, greatly reducing reinjection efficiency. To quantify the problem, stochastic permeability realizations were generated using Sequential Gaussian (SGS) algorithm. The effect of 5 different correlation lengths (i.e. the scale of heterogeneity) and 3 different variances were studied on the pressure in the well and in its surroundings. 2D transient flow modelling was carried out to quantify the effect of the heterogeneity on hydraulic head increase in the well.

The propagation of the pressure front was also monitored to assess the transient mechanisms of reinjection. Model results show a pressure increase of up to several bars over the typical lifetime of an injection well, strongly dependent on the heterogeneity scale. Anomalous pressure increase is observed when the pressure front reaches the lower permeability areas, indicating that areas distant from the well also play a part in the well head, and therefore influence injectivity. Additionally, the onset time of the pressure increase (days–weeks) is typically much longer than an average pumping test (2–8 hours), leading to the overestimation of the effective permeability values, and thus the injection well capacity. Therefore, understanding the influence of aquifer heterogeneity on reinjection efficiency, and relying on detailed preliminary geophysical and geological explorations can contribute to proper positioning of a reinjection well and the effective operation of geothermal systems.

Beérkezett: 2026. április 15.; elfogadva: 2026. június 16.

Bevezetés

A Pannon-medence geotermikus adottságait tekintve Európában a legkedvezőbb területek közé tartozik, az Alföld jelentős részén akár 90–120 mW/m² is lehet a felszíni hőáram értéke (Lenkey et al. 2021). Ezt a potenciált felismerve egyre több geotermikus projekt indul Magyarországon, többnyire közvetlen hőhasznosítási céllal, mezőgazdasági, ipari vagy épületfűtési felhasználásra (Szanyi et al. 2021). Kiemelten magasak a mélygeotermia által nyújtott lehetőségek, mely készleteinek felmérésére számos tanulmány született az elmúlt évtizedben (pl. Békési et al. 2018, Horváth et al. 2015, Lenkey et al. 2021; Nádor és Lenkey 2026). A valóban fenntartható geotermikus energiatermeléshez ugyanakkor a termásvíz kitermelése mellett kiemelt jelentőségű annak visszasajtolása is. A visszasajtoló kút létesítése – bár növeli a kezdeti költségeket – mellőzése a víztartó kimerülésével járhat, ami csökkenti a kút élettartamát, a porúsnomás csökkenése miatt felszínüllyedést okozhat, emellett a víz felszíni kiengedése veszélyezteti az érzékeny élővilágot (Szabó et al. 2023a). Magyarországon jelenleg egy nagyságrenddel több termelőkút működik, mint visszasajtoló, ami érzékelhető hatással van a regionális hidraulikai viszonyokra (Mádl-Szőnyi et al. 2024), például a dél-alföldi területen regionális léptékű depressziót okozva (Bálint és Szanyi 2015, Szanyi és Kovács 2010).

Egy visszasajtolási projekt azonban jelentős bizonytalansággal terhelt (Markó et al. 2024, Witter et al. 2019), porózus rezervoárok esetén világszerte tapasztalták, hogy sikeres termelésnél sem egyértelmű az azonos hatékonyságú visszasajtolás. A kút kialakítása után számos gyakorlati probléma merülhet fel, amelyek a visszasajtolás sikerét, ezáltal a teljes geotermikus projektet veszélybe sodorhatják. Az utóbbi évtizedekben több sikertelen visszasajtolást elemző kutatás készült, melyek számos fizikai, kémiai és biológiai eredetű problémát ismertek fel (Luo et al. 2023).

Megfelelő szűrőzés hiányában a termelőkútból finom közzszemcsék kerülhetnek a rezervoárba, vagy mobilizálódhatnak a visszasajtoló kút környezetéből, amelyek lerakódva eltömíthetik a porustorkokat. A visszasajtoló víz jellegéből adódóan alacsonyabb hőmérsékletű a mátrixnál, ami annak összehúzóását eredményezi, továbbá a lehűlt fluidumból oldott anyagok (pl. karbonát, gipsz) csapódhatnak ki a porustorkok falán (Ungemach 2003). A fluidum kémiai összetételétől és hőmérsékletétől függően pedig különböző mikrobák szaporodhatnak el benne, melyek egy része biofilmet képez, ami az eltömődéshez hozzájárulva csökkenti az injektivitást (Szanyi et al. 2015). A felsorolt hatások többnyire a kúton belül vagy a kút közvetlen környezetében, lokális skálán jelentkeznek. Bár kétségtelenül nagy jelentőséggel bírnak, a legtöbb kutatás figyelmen kívül hagyja a rezervoár kúttól távolabb eső vízföldtani viszonyait, a víztartó radiális változásait, kiterjedését, azaz a rezervoár léptékű heterogenitást, amely szintén befolyásolhatja a visszasajtolás hatékonyságát (Markó et al. 2021). Amennyiben mégis számba veszik a kútközei rezervoár radiális heterogenitását, úgy ez a hidrogeológiai valóságot leegyszerűsítő formában történik, például bizonális áramlás feltételezésével (Székely és Galsa 2006). A víztartó átteresztőképességének vertikális változása már a korai földtani modellek óta ismert és elfogadott, viszont gyakori feltételezés a horizontálisan homogén modell közelítés, így a laterális heterogenitás vizsgálata legtöbbször elmarad. A jelentős heterogenitás befolyásolja 1) a hasznos rezervoártérfogat nagyságát, 2) a jó permeabilitású zónák közötti konnektivitás mértékét és 3) a termelő és visszasajtoló kutak közötti kapcsolatot; ezáltal hatással lehet a visszasajtolás hatékonyságára is.

Az olajipari gyakorlattól eltérően geotermikus projektek esetén akár egy sikertelen fúrás is a projekt leállítását, bukását jelentheti, így rendkívül fontos mindennemű előzetes felmérés, vizsgálat, ugyanakkor a legtöbb esetben a rezervoár heterogenitásának hatása figyelmen kívül marad.

A fúrás után elvégzett, szabvány szerint kivitelezett kúttesztek – bár a közeg hidraulikai paramétereit mérik – gyakran túl rövid időskálát fednek le a makroskálájú léptékű hatások érzékeléséhez. A hatás előzetes vizsgálatához nyújt költséghatékony lehetőséget a numerikus modellezés, és fontos eszközzé válhat egy sikeres geotermikus projekt megvalósításában.

A heterogenitás vizsgálatának szükségességét (elsősorban karsztos rezervoárookban) már a század elején felismerték (Eaton 2006), a hatás számszerűsítésével sziliciklasztos víztartók esetén viszont kevés tanulmány foglalkozik. Több tanulmány komplex rendszerek részeként a rezervoár heterogenitását is beleépíti a modellbe, legtöbb esetben azonban eredményeik a kútpár konnektivitására, a visszasajtolás okozta hőmérséklet-csökkenésre és annak élettartamra gyakorolt hatására fókuszálnak, nem vizsgálva részletesen a heterogenitás hatását a visszasajtoló kút nyomásviszonyaira (Babaei és Nick 2019, Budai et al. 2024, Crooijmans et al. 2016, Major et al. 2023). Ezért a jelen tanulmány fő célja a sziliciklasztos rezervoárok laterális permeabilitás heterogenitásának a visszasajtoló kutakban kialakuló vízszintekre gyakorolt hatásának kvantifikálása szintetikus numerikus modelleken keresztül. Célunk továbbá a visszasajtolás hatékonyságát csökkentő és energiaigényét növelő kedvezőtlen hatások (azaz a visszasajtolási nyomás növekedése) észlelési idejének meghatározása.

A kutatás valós analógiája az ország késő miocén, pannóniai korú sziliciklasztos delta rétegsora, melyben a laterális heterogenitás fő oka az agyag- és homoküledékek térben váltakozó mozaikos települése. Utóbbit az üledék-képződési környezet váltakozása idézi elő, így például a deltafront homokgazdag, valamint a prodelta és selflejtő aleurit-agyag dominálta üledékei közötti horizontális átmenet vagy a deltafronti torkolati zátony homoktestek és a deltasíkság aleurit-agyagos üledékeinek átmenete

(Ben Mahrez et al. 2023, Szabó et al. 2023b, Sztanó et al. 2026). A heterogén közeget sztochasztikus permeabilitás-eloszlások reprezentálják, melyeket a Szekvenciális Gaussi Szimuláció (SGS) (Deutsch 2014) geostatistikai algoritmus segítségével generáltunk. Konkrét célunk tehát a permeabilitáseloszlás statisztikai paramétereinek (heterogenitáskálája és -szórása) a visszasajtoló kútban érzékelhető nyomásviszonyokra gyakorolt hatásának vizsgálata. A heterogén rezervoárookban áramlási szimulációt végzünk, majd a számszerű eredmények alapján összegezzük a heterogenitás geotermikus projektekre gyakorolt kockázatát mind a kútfejnyomást, mind a távolhatást tekintve.

A numerikus modell

A porózus közegben kialakuló nyomásviszonyokat két-dimenziós (horizontális) végeselemes numerikus modellekben tanulmányoztuk, ahol a rezervoár heterogenitását heterogén permeabilitáseloszlások formájában építettük a modellbe. A nyomásviszonyok tárgyalásához bevezetjük a hidrogeológiában általánosan használt hidraulikus emelkedési magasságot:

$$h = z + \frac{p}{\rho g}, \quad (1)$$

ahol a h , z , p , ρ és g jelölések egyenként a hidraulikus emelkedési magasság [m], a referenciaszinttől (pl. tengerszinttől) mért magasság [m], a nyomás [Pa], a víz sűrűsége [kg/m^3] és a gravitációs gyorsulás [m/s^2]. Az egyenlet utolsó tagja összevonva a mérési szint feletti vízoszlop nyomás-emelkedési magassága [m]. A numerikus modellezés során a fizikai problémát leíró időfüggő kontinuitási egyenlet és a Darcy-törvény alkotta parciális differenciálegyenlet-rendszert oldottuk meg:

1. táblázat | Modellparaméterek. A félkövérrel kiemelt értékek a vizsgált paraméterek tartományait jelölik
Table 1 | Model parameters. The highlighted data indicate the domains of the investigated parameters

Megnevezés	Jelölés	Érték	Mértékegység
Belső modelltartomány sugara	R_{in}	5000	m
Külső, homogén közeg sugara	R_{out}	$100 R_{in}$	m
A vizsgált rezervoár vastagsága	d	50	m
Kút átmérője	d_w	0,15	m
Visszasajtoló víz hozama	Q	500	l/min
Víz sűrűsége	ρ	1000	kg/m^3
Víz dinamikus viszkozitása	η	10^{-3}	Pa·s
Fajlagos tározási tényező	S_s	10^{-4}	1/m
Helyzeti magasság	z	-1000	m
Gravitációs gyorsulás	g	9,8065	m/s^2
Külső, homogén közeg permeabilitása	k_{out}	10^{-13}	m^2
Heterogén közeg átlagos permeabilitása	k_{avg}	10^{-13}	m^2
Heterogén permeabilitáseloszlás szórásnégyzete	σ^2	0,25–1	1
Heterogenitás skálája	R	100–2000	m

$$\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\rho q) = Q_m, \quad (2)$$

$$q = -\frac{k}{\eta} \nabla p, \quad (3)$$

ahol a (2), (3) egyenletekben $\mathbf{q}(q_x, q_y)$ [m/s] a Darcy-fluxus, továbbá az S_s , h , t , Q_m , k , η jelölések egyenként a fajlagos tározási tényező [1/m], a hidraulikus emelkedési magasság [m], az idő [s], a tömegforrás [kg/m³/s], a közeg permeabilitása [m²], illetve a víz dinamikus viszkozitása [Pa·s]. A szimuláció során a víz sűrűségét és viszkozitását állandónak tekintettük (elhanyagolva annak pl. a hőmérsékletfüggését), hogy tisztán a rezervoár heterogenitásának hatására koncentrálhassunk. A (2), (3) csatolt parciális differenciálegyenlet-rendszer numerikus megoldása során a nyomást és a Darcy-fluxust mint időfüggő ismeretleneket számítjuk.

A szimulációk során használt modellparamétereket az 1. táblázat foglalja össze, amelyeket általánosan a hazai visszasajtoló kutakra, a sziliciklasztos Pannon-rétegsor víztározóira, illetve a vízre jellemző értékek alapján választottunk meg. A tanulmányban a permeabilitás értékére a gyakorlatban elfogadott módon a darcy mértékegységet (D) is használjuk, ahol $1 \text{ D} = 10^{-12} \text{ m}^2$, illetve ennek ezredrésze, $1 \text{ mD} = 10^{-15} \text{ m}^2$.

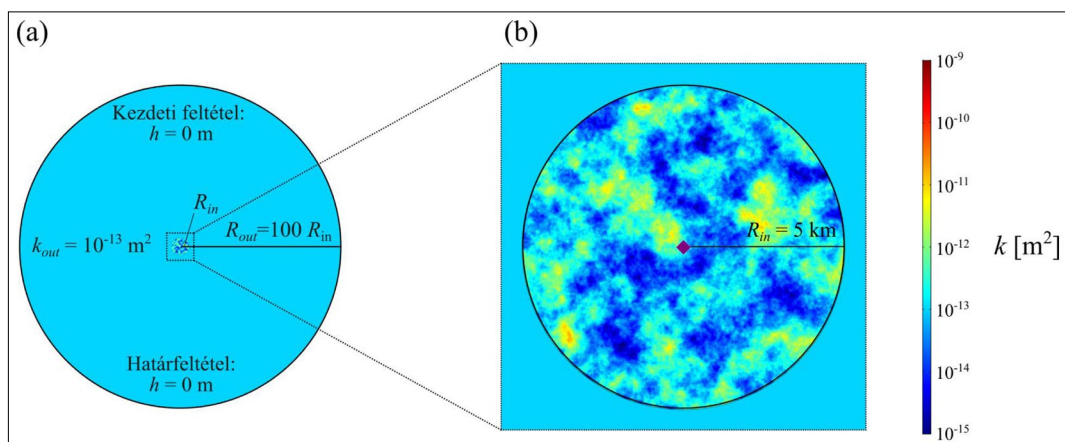
Az alapmodell

Az alapmodell egy kétdimenziós kör alakú modell, melynek középpontjában helyezkedik el a pontszerű $Q = 500 \text{ l/min}$ hozamú visszasajtoló kút (1. ábra). Mivel (homogén esetben) a nyomás emelkedése és a nyomásfront terjedése is körszimmetrikus, ezek vizsgálatára ideális a kör alakú modelltartomány. A kút körül heterogén permeabilitáseloszlású közeget helyeztünk el, melynek sugara $R_{in} = 5 \text{ km}$ volt, azon kívül, az $R_{out} = 500 \text{ km}$ távolságig a permeabilitáseloszlás homogén volt $k_{out} = k_{avg} = 100 \text{ mD}$

értékkel, vagyis a homogén tartomány permeabilitása megegyezett a heterogén terület átlagos permeabilitásával. A rezervoár vastagsága $d = 50 \text{ m}$ volt, felette és alatta tökéletes vízzáró réteget alkalmaztunk.

A nyomás változását a hidraulikus emelkedési magasságon (h) keresztül tanulmányoztuk, és úgy választottuk meg, hogy $h = 0 \text{ m}$ esetén az a hidrosztatikus nyomással legyen egyenlő, így a kezdeti feltétel lényegében a $h = 0 \text{ m}$ értékkel definiálható. A vizsgált problémának nincs stationárius megoldása, hiszen a nyomásfront – bár logaritmikusan lassuló ütemben – de folyamatosan távolodik a kúttól, vagyis az alkalmazott határfeltétel távolsága befolyásolja a modellen belül kialakuló hidraulikus emelkedési magasságeloszlást. Emiatt a vizsgált 5 km sugarú heterogén térrészt egy 500 km ($100 R_{in}$) sugarú homogén közegbe ágyaztuk, és a határfeltételt 500 km távolságban definiáltuk $h = 0 \text{ m}$ -ként (1a. ábra). Mindez azt jelenti, hogy a modellben a vízáramlást tisztán a visszasajtolás okozza. A modell kétdimenziós jellege miatt egyetlen szűrőzött réteget modellez és nem a teljes effektív szűrőhosszt. Ebből a megfontolásból a „rétegvastagság” (ami egyben megegyezik szűrőhosszal, hiszen a réteget teljes vastagságban szűrőzzük) $d = 50 \text{ m}$. A „rétegvastagság” jelentősége, hogy a $Q = 500 \text{ l/min}$ hozam ezen 50 m szűrőintervallum mentén oszlik el (Q/d) a 2D közelítésnek megfelelően.

A visszasajtolás problémáját leíró (2), (3) egyenletrendszert a COMSOL Multiphysics® 5.3a végesesemes numerikus modellező szoftvercsomag segítségével oldottuk meg (Zimmerman 2010). A kétdimenziós modellt háromszögelemekkel diszkrétizáltuk, a heterogenitás kis változásainak megőrzése érdekében a heterogén, az R_{in} sugarú tartományon belül 20 m maximális elemmérettel, így a modell összesen körülbelül $680\,000$ elemet tartalmazott. A szimulációkat $t = 1000$ évig végeztük, így egy szimuláció körülbelül $100\text{--}120$ perc CPU-időt (Intel i7 9700 processzor) és $5,5 \text{ GB}$ memóriát igényelt, melyeket a modell fizikai paraméterei csak kis mértékben befolyásoltak. A jelen ta-



1. ábra A végesesemes modell geometriája határ- és kezdeti feltételekkel, a permeabilitáseloszlás logaritmusos skálán van megjelenítve. (a) A teljes modelltartomány, (b) a centrális heterogén közegre közelített ábra

Figure 1 Finite element model geometry with initial and boundary conditions. Color scale according to logarithmic permeability. (a) The entire model domain, (b) zoomed into the heterogeneous domain

nulmányban összesen 140 heterogén, illetve 5 homogén szimuláció eredményeit mutatjuk be.

Modellparametrizálás

A szintetikus szimulációk során a sztochasztikusan heterogén permeabilitáseloszlás két statisztikai paraméterének hatását vizsgáltuk a kútban és a rezervoárban tapasztalható nyomásviszonyokra. Szisztematikusan tanulmányoztuk a heterogenitás skálájának, R (a permeabilitáseloszlás korrelációs hosszának), illetve a heterogenitás szórásnégyzetének, σ^2 (varianciájának) szerepét a modelleredményekre (2. ábra). Míg R értéke, azaz a heterogenitás skálája befolyásolja a közel azonos permeabilitású zónák (pl. homok- és agyagtestek) méretét, addig σ^2 értéke ezen zónák közötti permeabilitásváltozás nagyságát szabályozza. Tehát például nagyobb R értéknél egy homoktestben elhelyezett kút esetén kedvezőbb nyomásviszonyok várhatók a visszasajtolás folyamán. A parametrizálás során összesen ötféle R és háromféle σ^2 értéket vizsgáltunk (2. ábra).

Az R értékek választása során figyelembe vettük a sziliciklasztos környezetekre, illetve a Pannon-rétegsorokra jellemző értékeket. Budai et al. (2024) statisztikai elemzést készített a torkolati zátonyok alkotta homokkőtestek geometriájáról. Eredményei alapján az Üllés-medencében a torkolati zátonyok átlagos szélessége 1600 m-nek, míg hosszúsága 2500 m-nek adódott (Várkonyi D. 2019), nemzetközi viszonylatban pedig a 600–3000 m közötti értékek jellemzőek. Willems et al. (2019) a Békési-medencére 100–400 m közötti értékeket állapítottak meg. Így nem

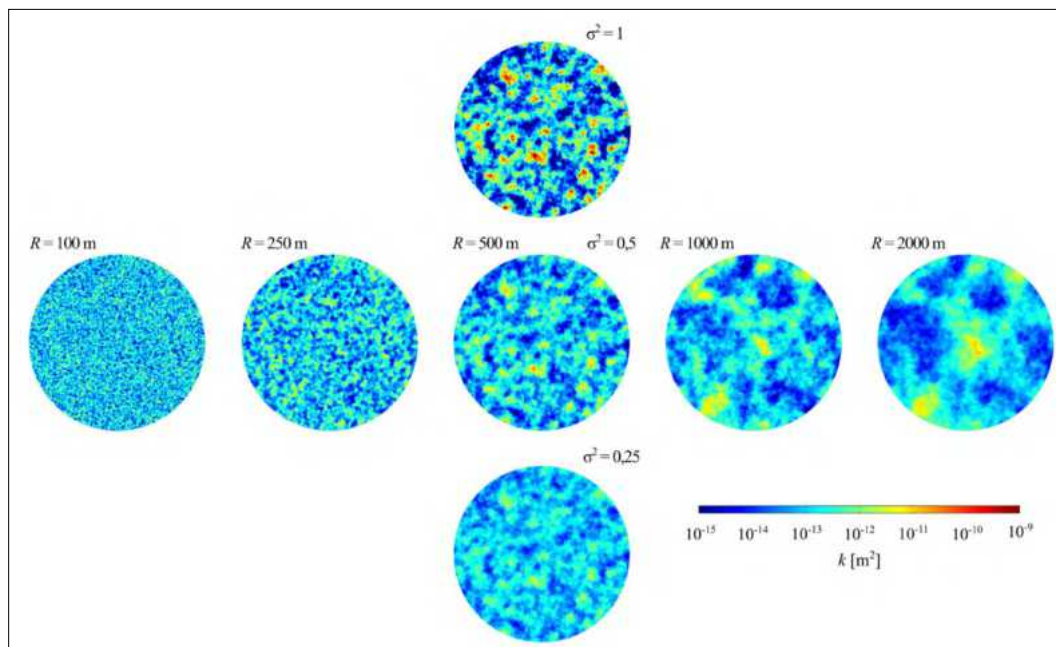
egy kiválasztott üledései környezet, hanem általánosságban a heterogén sziliciklasztos környezetek reprezentációjának érdekében a numerikus vizsgálatra a heterogenitás skálájának az $R = 100$ – 2000 m tartományt választottuk.

A Pannóniai üledékek petrofizikai elemzése során a homokkövek átlagos permeabilitására 150–1100 mD (Willems et al. 2021), illetve 60–390 mD (Njeru et al. 2024) értékeket határoztak meg. Koroncz et al. (2022) klaszteranalízise két típusú homokkő esetén 1400 mD és 650 mD, míg aleuritos homok esetén 60 mD, agyag esetén 0,36 mD átlagos permeabilitást állapított meg. Ezek figyelembevételével a permeabilitáseloszlás átlagát $k_{\text{avg}} = 100$ mD-nak választottuk, ami agyagos homokot reprezentál. Az eloszlás szórásnégyzetét az alapmodell esetén $\sigma^2 = 0,5$ -nek választottuk, ami szerint a permeabilitáseloszlás mintegy 84%-a esik a 10–1000 mD tartományba. A szórásnégyzet hatását $\sigma^2 = 0,25$ – 1 közötti tartományban vizsgáltuk.

R és σ^2 hatását a kútban kialakuló hidraulikus emelkedési magasság (h), valamint a nyomásfront pozíciójának időbeli monitorozásával tanulmányoztuk. Utóbbi a távolságot számszerűsíti, ahol a $h = 1$ m vízszintnövekedésnek a visszasajtoló kúttól mért maximális (r_{max}), illetve minimális távolságát (r_{min}) vizsgáltuk, Molnár et al. (2026) védőidom-tanulmányozásával analóg módon.

Heterogén permeabilitáseloszlás létrehozása

A heterogén közegek generálásához a Szekvenciális Gaussi Szimulációt (SGS) alkalmaztuk, mely széles körben elfogadott sziliciklasztos rezervoárok reprezentálására (pl. Budai et al. 2024, Geiger 2006, Major et al. 2023, Molnár et



2. ábra A vizsgált statisztikai paraméterek ábrázolása 1-1 kiválasztott permeabilitásrealizáción keresztül. Vízszintesen R , a heterogenitás skálájától való függés, függőlegesen σ^2 , a heterogenitás szórásnégyzetétől való függés látható, azonos (logaritmusos) permeabilitásskálán ábrázolva

Figure 2 Studied statistical parameters of the heterogeneous permeability distribution, illustrated through one permeability realization each. Horizontal axis: influence of R , the scale of the heterogeneity. Vertical axis: influence of σ^2 , the variance of the heterogeneity. All realizations are colored on the same scale, according to logarithmic permeability

al. 2025). Az SGS egy normál eloszlású, folytonosan változó eloszlást hoz létre, azaz a szomszédos cellák között nincs jelentős értékbeli ugrás. Az SGS a gyakorlatban gyakran használt módszer a mért adatokra való jó illeszkedés és a közeg jó reprezentációja miatt (Deutsch 2014), de mért adatok nélkül is kiválóan alkalmas adott statisztikai paraméterekkel jellemzett sztochasztikus eloszlás létrehozásához.

A heterogén eloszlások generálásához az SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) 1.4 programot (Bianchi és Zheng 2009) használtuk. Az SGS geostatisztikai eljárás végső, transzformációk utáni eredménye számtalan egymással azonos valószínűségű, lognormális eloszlású permeabilitásrealizáció. A permeabilitás lognormális eloszlása elfogadott közelítés a gyakorlatban sziliciklasztos rezervoárok esetén. A permeabilitáseloszlás átlaga $k_{\text{avg}} = 100$ mD volt, mely sziliciklasztos környezetben lévő agyagos homoktartományokat reprezentál. Az ettől magasabb értékek a növekvő homoktartalmat, szemcseméretet, így az ideálisabb rezervoárközetet jelentik, míg az ettől kisebb értékek az agyagszemcsék növekvő arányát, így vízfogó képződményeket reprezentálnak. A heterogén permeabilitáseloszlás skálája, horizontális mérete $R = 100\text{--}2000$ m között változott a különböző modellekben, míg a permeabilitás logaritmusának szórásnégyzete $\sigma^2 = 0,25\text{--}1$ között. Adott R és σ^2 paraméterek esetén egyetlen sztochasztikus permeabilitáseloszlás nem jellemzi kellőképpen a rendszert. Ezért minden (R, σ^2) esetben 20 permeabilitásrealizációt generáltunk, s a (2), (3) egyenletrendszert mindegyik modellre megoldottuk, mely – előzetes vizsgálataink alapján – statisztikai értelemben már kellőképpen robusztus megoldást szolgáltatott.

A visszasajtoló kút a modell geometriájának megfelelően centrálisan helyezkedett el a rezervoárban. A gyakorlatban törekednek arra, hogy a kút „szűrőzött” szakasza nagy permeabilitású tartományba kerüljön. Ezt a szimuláció során úgy vettük figyelembe, hogy a heterogenitás generálásakor előírtuk, hogy a kút pozíciójában a permeabilitás 1000 mD legyen, azaz egy nagyságrenddel meghaladja az átlagos értéket. A szórásnégyzettől függően ez 1–2 szórással tér el az átlagtól. Ezen feltétel elősegíti a statisztikai paraméterek összehasonlíthatóságát, mivel a kút kis környezetében minden esetben megegyezik a permeabilitás, így a modellszámítás kezdeti időtartományában ($t = 10^{-5}\text{--}10^{-2}$ év) a hidraulikus emelkedési magasság is hozzávetőlegesen megegyező.

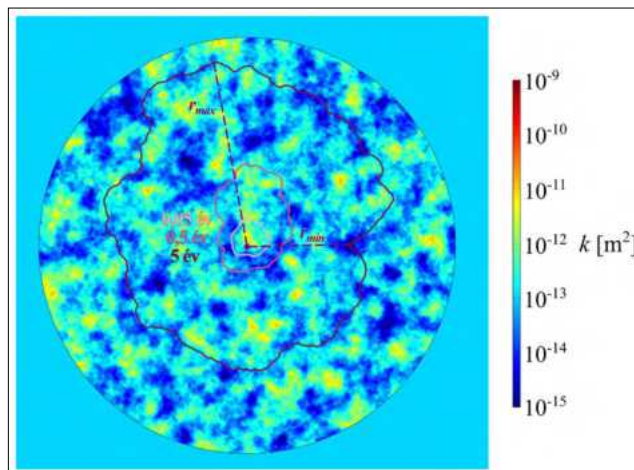
Eredmények

Ebben a fejezetben a nyomásviszonyok alakulását mutatjuk be szisztematikusan változtatva a heterogenitás skálájának és szórásnégyzetének értékét. Első lépésben az alapmodell eredményeit ismertetjük mind kvalitatív, mind kvantitatív módon, majd az R és σ^2 hatását a hidraulikus emelkedési magasságra. A számszerű értelmezés során a vizsgált 20–20 realizáció átlagát és szórását használjuk fel.

Az alapmodell eredményei

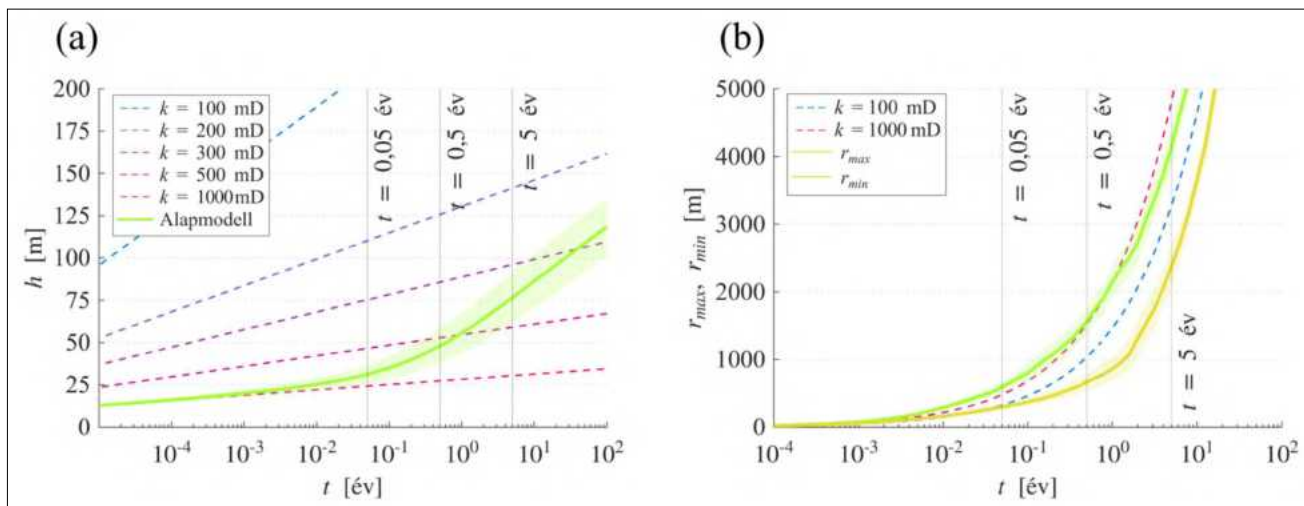
Az alapmodellt az 1. táblázatban listázott értékek jellemzik, emellett a heterogenitás skálája $R = 500$ m, szórásnégyzete $\sigma^2 = 0,5$. A 3. ábra az alapmodell egyetlen realizációjának permeabilitáseloszlását illusztrálja, melyen három időpillanathoz tartozó $h = 1$ m hidraulikus emelkedési magasságot jelölő kontúrvonalat is feltüntetünk. Más szóval, a nyomás frontjának terjedése figyelhető meg, ami érzékelteti, hogy a vízszintnövekedés hamarabb következik be a nagyobb permeabilitású régiókban, a rezervoárba visszasajtoló víz a kisebb ellenállású útvonalon gyorsabban terjed.

Az alapmodell kvantitatív eredményeit a 4. ábra mutatja be. A 4a. ábrán a besajtoló kútban tapasztalt h (hidraulikus emelkedési magasság) időbeli változása figyelhető meg, ahol az alapmodellt jelölő zöld görbe a 20 permeabilitásrealizáció átlagát, a színezett tartomány ezek szórását jelzi. A szaggatott vonallal jelölt görbék a homogén közegben történt referenciaszámítások eredményeit mutatják öt különböző permeabilitású modellben. A homogén esetekben h lineárisan nő a féllogaritmikus skálán, melynek meredeksége arányos a közeg permeabilitásának reciprokával (pl. Cooper és Jacob 1946). A szimuláció első fázisában ($t = 10^{-5}\text{--}10^{-2}$ év) a heterogén alapmodell átlaga együtt fut az 1000 mD permeabilitású homogén görbével, ami konzisztens az előírt feltétellel, miszerint a visszasajtolás minden realizáció esetén egy nagy, $k = 1000$ mD permeabilitású közegben történt. Ugyanezen ok miatt, ekkor a 20 realizáció szórása közel zérus. A kútban tapasztalt h görbe meredeksége pár nap után megnő, ahogy a nyomás frontja eléri a jól vezető tartomány végét, s behatol az alacsonyabb permeabilitású közegbe (3. ábra). A visszasajtolás kezdete



3. ábra Az alapmodell ($R = 500$ m, $\sigma^2 = 0,5$) heterogén permeabilitáseloszlásának egy realizációja. A kontúrvonalak a $h = 1$ m értéket kötik össze $t = 0,05, 0,5$ és 5 év időpillanatokban. r_{max} és r_{min} a nyomásfront (így a kontúrvonal) kúttól való maximális és minimális távolságát számszerűsíti

Figure 3 One heterogeneous permeability realization of base model ($R = 500$ m, $\sigma^2 = 0.5$). Contour lines connect points with $h = 1$ m at $t = 0.05, 0.5$ and 5 yr, respectively. r_{max} and r_{min} measure maximum and minimum distance of the pressure front (i.e., the contour line) from the well



4. ábra A heterogén alapmodell ($R = 500$ m, $\sigma^2 = 0,5$) eredményeinek kvantitatív összegzése. A heterogén (folytonos) görbék 20 realizáció átlagolt eredményeit, a színezett tartomány azok szórását jeleníti meg. (a) A kútban számított hidraulikus emelkedési magasság, kiegészítve öt homogén modelleddel (szaggatott vonal). (b) A nyomás frontjának maximális (r_{max}) és minimális (r_{min}) távolsága a kúttól mérve az idő függvényében a heterogén alapmodellben, valamint két homogén modellben. Az eredmények féllogaritmus skálán vannak feltüntetve

Figure 4 Quantitative results of the base model ($R = 500$ m, $\sigma^2 = 0.5$). The solid lines show the averages of 20 heterogeneous realizations; shaded areas show their standard deviation. (a) Hydraulic head calculated in the injection well with 5 homogeneous solutions as references. (b) Maximum (r_{max}) and minimum (r_{min}) distance of the pressure front from the well, supplemented by 2 homogeneous model results. Results shown on a semi-logarithmic scale

után 18 nappal (0,05 év) a kútban $h = 31$ m-rel nőtt a vízszint, ami mintegy 30% növekményt jelent az 1000 mD homogén esethez képest. Fél év elteltével $h = 48$ m, ami már kb. 75% növekménynek felel meg, míg 5 év után $h = 77$ m, így az eltérés 150%. A heterogén rezervoárba mélyített besajtoló kútban 5 év után az üzemi vízszint meghaladja a homogén, $k = 500$ mD modellre jellemző h értéket, míg 100 év után a 300 mD-hoz tartozó modellnél is nagyobb. Megjegyzendő, hogy ezen a tartományon ($t > 1$ év) a heterogén alapmodellben tapasztalt h görbe meredeksége megegyezik a homogén, $k = 100$ mD görbe meredekségével, ami egyértelműsíti, hogy ekkor a kútbeli nyomásnövekedést már a heterogén közeg átlagos permeabilitása befolyásolja. Ugyanakkor az észlelt vízszintnövekedés jóval kedvezőbb annál, mintha a közeg homogén, $k = 100$ mD permeabilitású lenne.

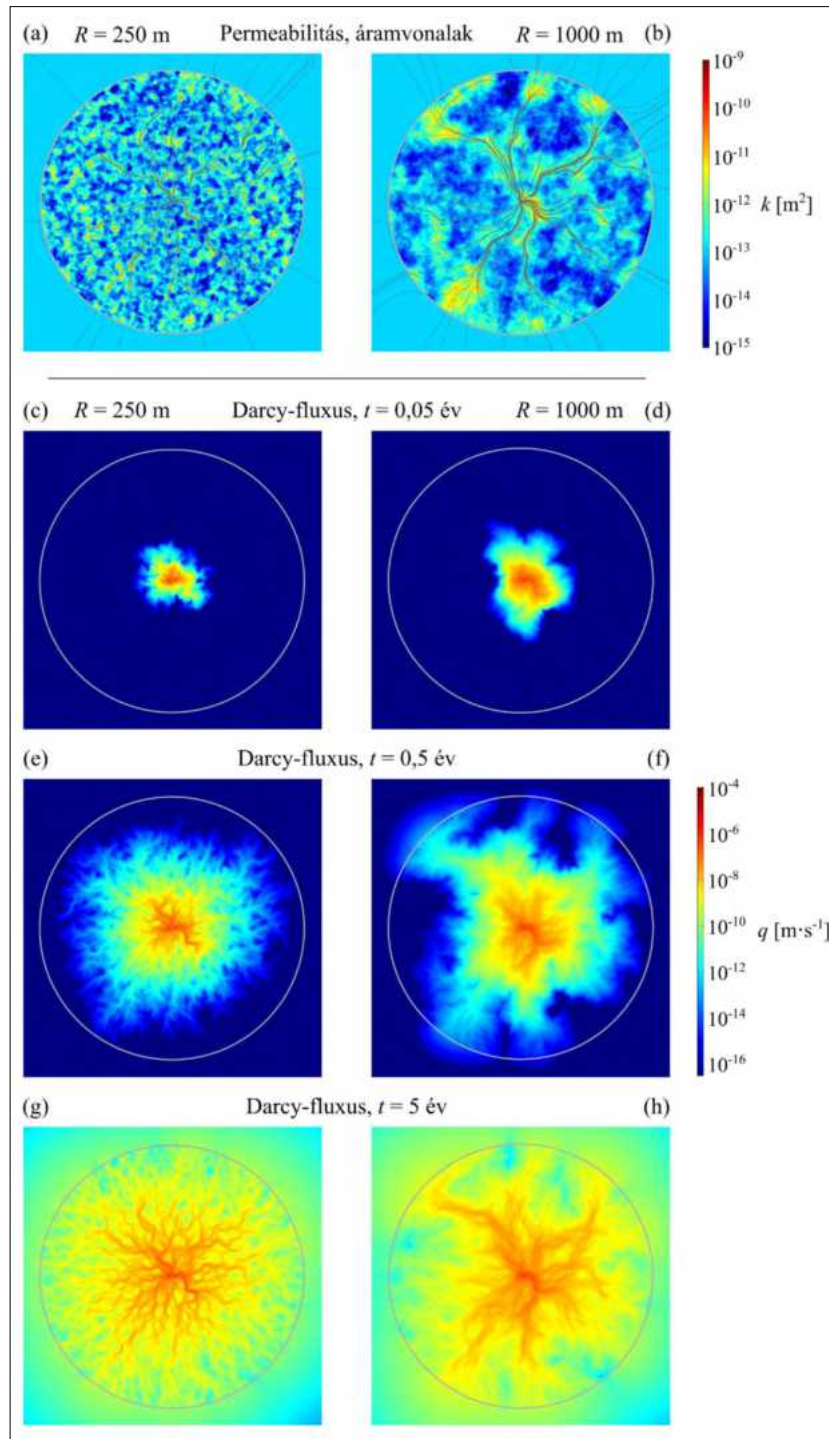
A visszasajtolás következtében fellépő nyomásnövekedés távolhatásának időbeli változását a 4b. ábra érzékelteti. Itt r_{max} attól a kúttól mért maximális távolságot mutatja, ahol a hidraulikus emelkedési magasság növekménye már elérte a $h = 1$ m küszöbértéket, míg r_{min} a $h = 1$ m kontúrhoz tartozó minimális távolságot. Vizuálisan ez a $h = 1$ m kontúrvonal maximális, illetve minimális távolságát jelenti a centrális kúthoz képest (3. ábra). A maximális távolhatás eleinte még a $k = 1000$ mD homogén modellét is meghaladja, jelezve, hogy a kútközelben a közeg átlagos permeabilitása ennél nagyobb, de a teljes időtartományon is jóval a $k = 100$ mD görbe felett helyezkedik el. A heterogenitás így adott irányokba növeli a távolhatást, ami egyaránt konzisztens a nyomás és Darcy-fluxus eloszlásával (3. és 5. ábra). Ezzel szemben r_{min} mindvégig jelentősen kisebb a heterogén közeg átlagát reprezentáló $k = 100$ mD

homogén modell görbénél az agyagosabb zónák jelenléte miatt. Egyszóval, a nyomásnövekedés maximális és minimális távolsága közrefogja a homogén közegre jellemző távolhatásértéket.

A heterogenitás skálájának hatása

A permeabilitáseloszlás heterogenitási skálájának vizsgálata során ennek értékét $R = 100$ m–2000 m tartományban változtattuk, minden egyéb paraméter állandó maradt. A heterogenitás skálája szabályozza a hasonló permeabilitású tartományok karakterisztikus méretét. Általános esetben, ahogy a heterogenitás skálája zérushoz (vagy végtelenhez) tart, a porózus közeg permeabilitása a homogén eloszlást közelíti.

Az 5a. ábra a visszasajtoló víz preferált áramlási pályáit érzékelteti egy kisebb ($R = 250$ m) és egy nagyobb ($R = 1000$ m) heterogenitási skálával jellemezhető permeabilitáseloszlás realizációja esetén. Vizuálisan is belátható, hogy az áramvonalak elkerülik az agyagosabb, kisebb permeabilitású zónákat, helyettük a nagy és közepes permeabilitású, egymással összeköttetésben lévő útvonalakat preferálva. Az 5c.–h. ábrán a Darcy-fluxus térbeli eloszlásának evolúciója látható három különböző időpillanatban. Az idő múlásával az áramlás egyre távolabbi területeken jelenik meg a nyomás tovaterjedésének hatására. Megállapítható, hogy a Darcy-fluxus az idővel nő, viszont a permeabilitáseloszlástól függő preferált csatornák konzisztensen átlagon felüli fluxust mutatnak. A heterogenitás skálájának növekedésével az egyes csatornák száma csökken, de a méretük nő, ami kedvez az áramlásnak, így ugyanannyi idő elteltével nagyobb heterogenitási skála



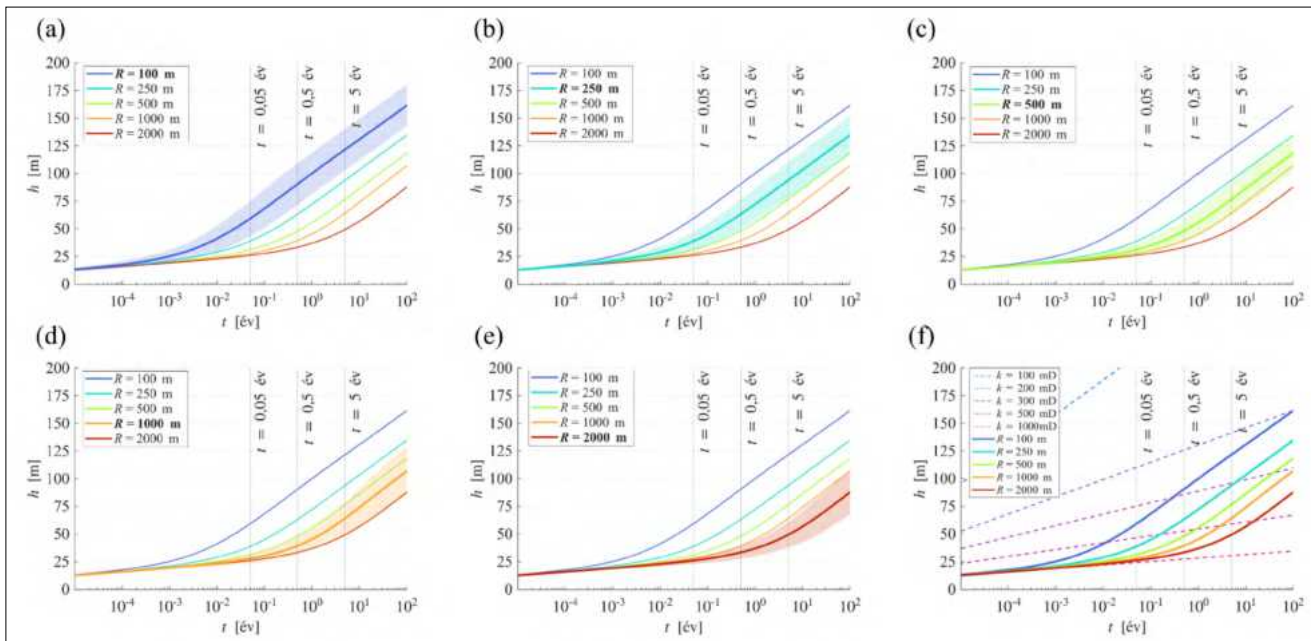
5. ábra Két különböző heterogenitási skálával jellemzett permeabilitáeloszlás esetén kialakuló áramlás jellemzői: $R = 250$ m (bal oszlop) és $R = 1000$ m (jobb oszlop). (a)–(b) A $t = 0,5$ évhez tartozó áramvonalak a heterogén permeabilitáeloszlással. (c)–(h) A Darcy-fluxus nagyságának eloszlása $t = 0,05, 0,5$ és 5 évvel a visszasajtolás kezdete után

Figure 5 Characterizing Darcy flux in one permeability realization with different scales of heterogeneity. Left column: $R = 250$ m; right column: $R = 1000$ m. (a)–(b) Streamlines at $t = 0.5$ yr, shown on the color scale of the permeability distribution. (c)–(h) Distribution of Darcy flux at $t = 0.05, 0.5$ and 5 yr

esetén az áramlás távolabb jut. A homogén tartomány határát elérve az áramlás térben egyenletesebbé válik. A különböző skálájú heterogenitásmodelleket összehasonlítva megállapítható, hogy – az elvárásoknak megfelelően – kisebb R esetén a Darcy-fluxus eloszlása jobban közelíti a homogén közegre jellemző körszimmetrikus megoldást.

Ezzel szemben, nagyobb R esetén az áramlás intenzívebb a preferált áramlási csatornák mentén, mely egyúttal a kút nagyobb távolhatását is előre vetíti.

A 6a.–e. ábrán a kútban számított átlagos hidraulikus emelkedési magasság idősorai vannak feltüntetve különböző R heterogenitási skála esetén. A jobb áttekinthetőség

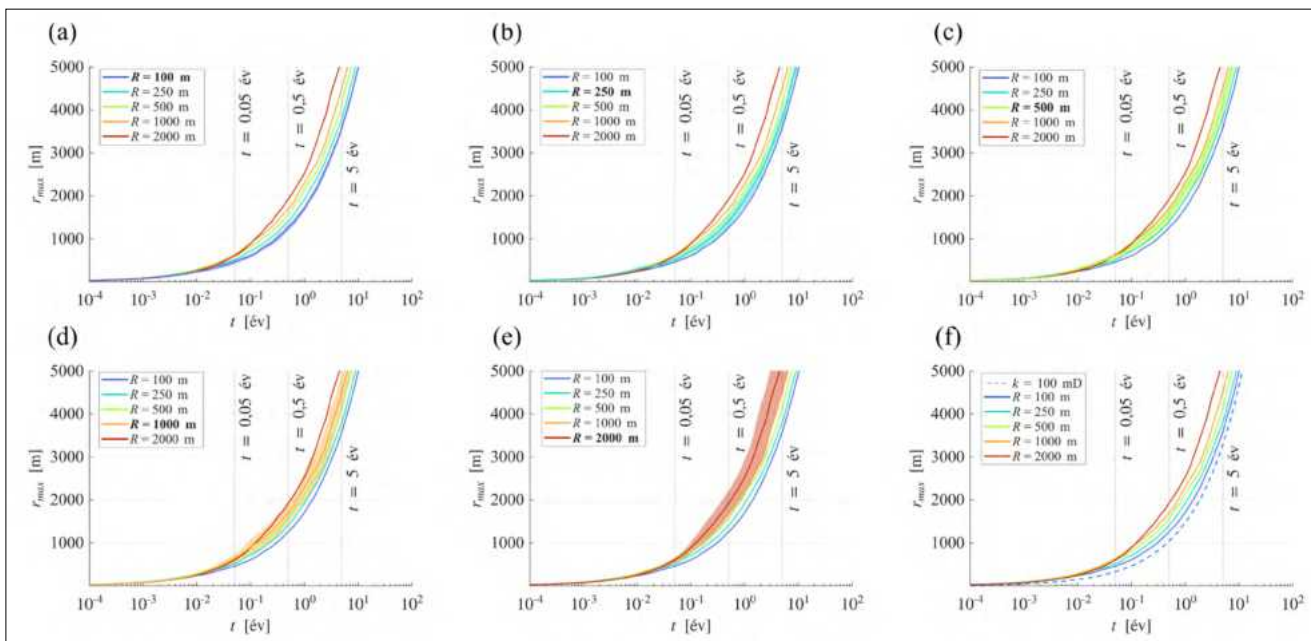


6. ábra A heterogenitás skálájának (R) hatása a kútban tapasztalt hidraulikus emelkedési magasságra az idő függvényében. Az idősorok a 20 heterogén permeabilitásrealizáció átlagát és szórását mutatják (a) $R = 100$ m, (b) $R = 250$ m, (c) $R = 500$ m, (d) $R = 1000$ m és (e) $R = 2000$ m esetén. (f) Átlagolt h értékek szórások nélkül, de a homogén modellel eredmények feltüntetésével

Figure 6 Effect of the scale of the heterogeneity (R) on the calculated well head time series. Graphs show the averaged results of 20 heterogeneous permeability realizations and their standard deviations for (a) $R = 100$ m, (b) $R = 250$ m, (c) $R = 500$ m, (d) $R = 1000$ m and (e) $R = 2000$ m, respectively. (f) Averaged results for each R , with 5 homogenous model results

kedvéért az egyes alábrákon csupán egyetlen R értékhez tartozó szórások láthatóak, míg a 6f. ábrán a szórás már nincs feltüntetve, ugyanakkor a homogén megoldások

mint referenciaértékek láthatóak. Zöld színnel az előző fejezetben részletesen tárgyalt alapmodellt tüntettük fel. Alapvetően két jelenség figyelhető meg a görbéken: egy



7. ábra A heterogenitás skálájának (R) hatása a nyomás frontjának maximális távolságára az idő függvényében. Az idősorok a 20 heterogén permeabilitásrealizáció átlagát és szórását mutatják (a) $R = 100$ m, (b) $R = 250$ m, (c) $R = 500$ m, (d) $R = 1000$ m és (e) $R = 2000$ m esetén. (f) Átlagolt r_{max} értékek szórások nélkül, de a homogén modellel eredmények feltüntetésével

Figure 7 Effect of the scale of the heterogeneity (R) on the maximum distance of the pressure front as a function of time. Graphs show the averaged results of 20 heterogeneous permeability realizations and their standard deviations for (a) $R = 100$ m, (b) $R = 250$ m, (c) $R = 500$ m, (d) $R = 1000$ m and (e) $R = 2000$ m, respectively. (f) Averaged results for each R , with a homogenous model result

részt nagyobb R esetén a teljes időtartományon alacsonyabb hidraulikus emelkedési magasság alakul ki a kútban, másrészt időben később következik a nagyobb meredekségű nyomásnövekedés, azaz vizuálisan később válik el a görbe a homogén, $k = 1000$ mD modell megoldásától (6f. ábra).

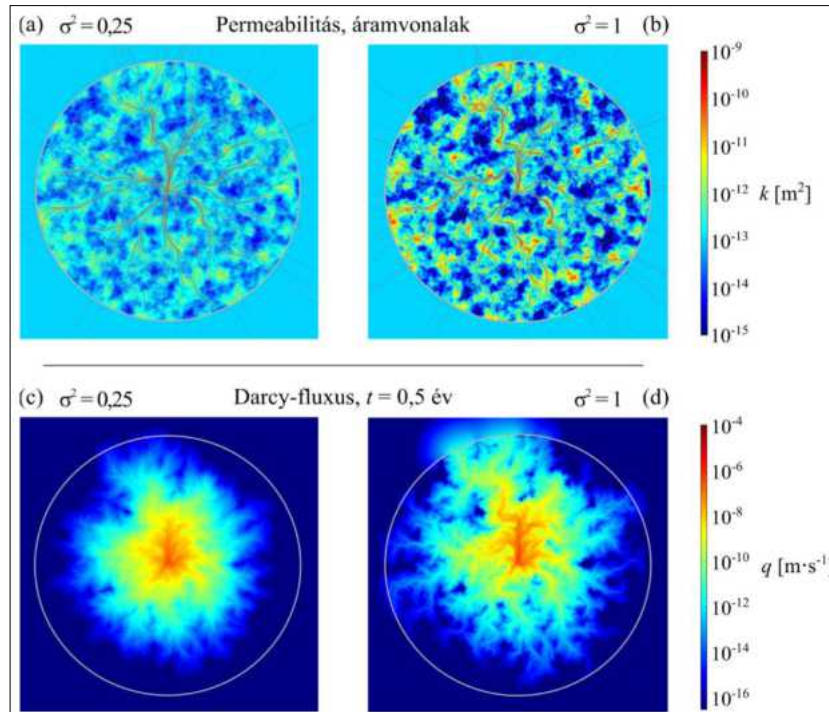
A jelenség magyarázata, hogy a kút egy nagy permeabilitású homoktestben lett elhelyezve, melynek karakterisztikus méretét R értéke határozza meg. Nagyobb kiterjedésű homoktestbe történő visszasajtolás esetén alacsonyabb üzemi vízszint tapasztalható. A nagyobb meredekségű növekedés a h görbén a nyomás frontjának terjedésétől függ, akkor következik be, amikor a front eléri az alacsony permeabilitású közeget (3. és 4. ábra). Mivel R meghatározza a nagy permeabilitású zóna kiterjedését, így nagyobb R érték esetén a meredekség növekedése később következik be. Míg az $R = 100$ m modellben már 10^{-3} év (~8 óra) körül jelentős a különbség a $k = 1000$ mD homogén modellhez képest, addig $R = 2000$ m esetén hasonló eltérés csak 10^{-1} év (~36 nap) után tapasztalható. Ismét megjegyezzük, hogy ebben az tartományban a h idősor meredeksége hozzávetőlegesen megegyezik a $k = 100$ mD homogén megoldásával, hiszen ez felel meg a heterogén közeg átlagos permeabilitásának.

A kútban tapasztalt üzemi vízszintnek 20–20 permeabilitásrealizáció alapján számított szórása megerősíti a fentebb ismertetett megállapításokat. A szórás növekedése akkor kezdődik, amikor a kútközeli nagy permeabilitású

tartomány véget ér, a nyomásfront a heterogén tartományba hatol. E szakaszban a szórás értéke függetlennek mutatkozik R értékétől. Megjegyezzük ugyanakkor, hogy ha a szórás értékét normáljuk a kútban számított aktuális hidraulikus emelkedési magassággal, akkor nagyobb R esetén nagyobb relatív szórás tapasztalható.

A 7. ábrán a heterogenitás skálájának hatása látható a nyomásfrontnak attól a kúttól mért maximális távolságára, ahol a $h = 1$ m növekmény bekövetkezik. Az ábra elrendezése megegyezik a 6. ábrával, tehát 7a.–e. ábrák az r_{\max} idősorokat mutatják, egy-egy R görbe szórásával kiegészítve, míg a 7f. ábra szórások nélkül látható, de a homogén modelledményekkel kiegészítve. A nyomásfront maximális távolságát $R_{\text{in}} = 5$ km-ig, a belső heterogén tartomány határáig ábrázoljuk, hiszen azon túl a görbe már nem reprezentatív a heterogén közegre vonatkozólag. Mivel ezt a határt R értékétől függően 5–10 év között éri el a nyomásfront a realizációk átlagai szerint (7f. ábra), így csupán ezen időtartományon belül tudunk következtetéseket levonni.

A 6. ábrához hasonlóan az öt különböző R értékhez tartozó r_{\max} görbe a kezdeti időtartományon együtt halad, majd 10^{-2} év körül kezdenek elválni. Nagyobb R érték esetén nagyobb a nyomásfront maximális kiterjedése, ami a központi homoktestben való gyorsabb terjedéssel magyarázható. Ez egybevág azzal, hogy nagy R esetén a nagyobb távolhatáshoz alacsonyabb kútbéli h tartozik (6. ábra), hiszen a visszasajtoló vízmennyiség nagyobb tartományban



8. ábra | Az áramlás jellemzői két különböző szórásnégyzettel bíró permeabilitáseloszlás esetén $R = 500$ m mellett: $\sigma^2 = 0,25$ (bal oszlop) és $\sigma^2 = 1$ (jobb oszlop). (a)–(b) A $t = 0,5$ évhez tartozó áramvonalak a heterogén permeabilitáseloszlással. (c)–(d) A Darcy-fluxus nagyságának eloszlása $t = 0,5$ évvel a visszasajtolás kezdete után

Figure 8 | Characterizing Darcy flux in heterogeneous media with $R = 500$ m and two different permeability variances. Left column: $\sigma^2 = 0,25$; right column: $\sigma^2 = 1$. (a)–(b) Streamlines at $t = 0,5$ yr, shown on the color scale of the permeability distribution. (c)–(d) Distribution of Darcy flux at $t = 0,5$ yr

oszlík el. A 7f. ábra kiemeli, hogy R , azaz a heterogenitás skálájának csökkenésével a nyomásfront távolsága közelít a $k = 100$ mD homogén modell eredményéhez. Mindez azt jelenti, hogy heterogén tározóban a nyomásfront gyorsabban terjed, mint homogén tározóban, ha az előbbi átlagos permeabilitása megegyezik a homogén rezervoáréval.

A nyomásfront maximális távolságának szórását minden R érték esetén kiszámítottuk a 20–20 permeabilitás-realizációra. Ezek szerint r_{max} szórása nő a heterogenitási skálával; míg $R = 100$ m esetén alig látható (7a. ábra), addig $R = 2000$ m mellett sokkal nagyobb eltérések lépnek fel az egyes realizációk között (7e. ábra).

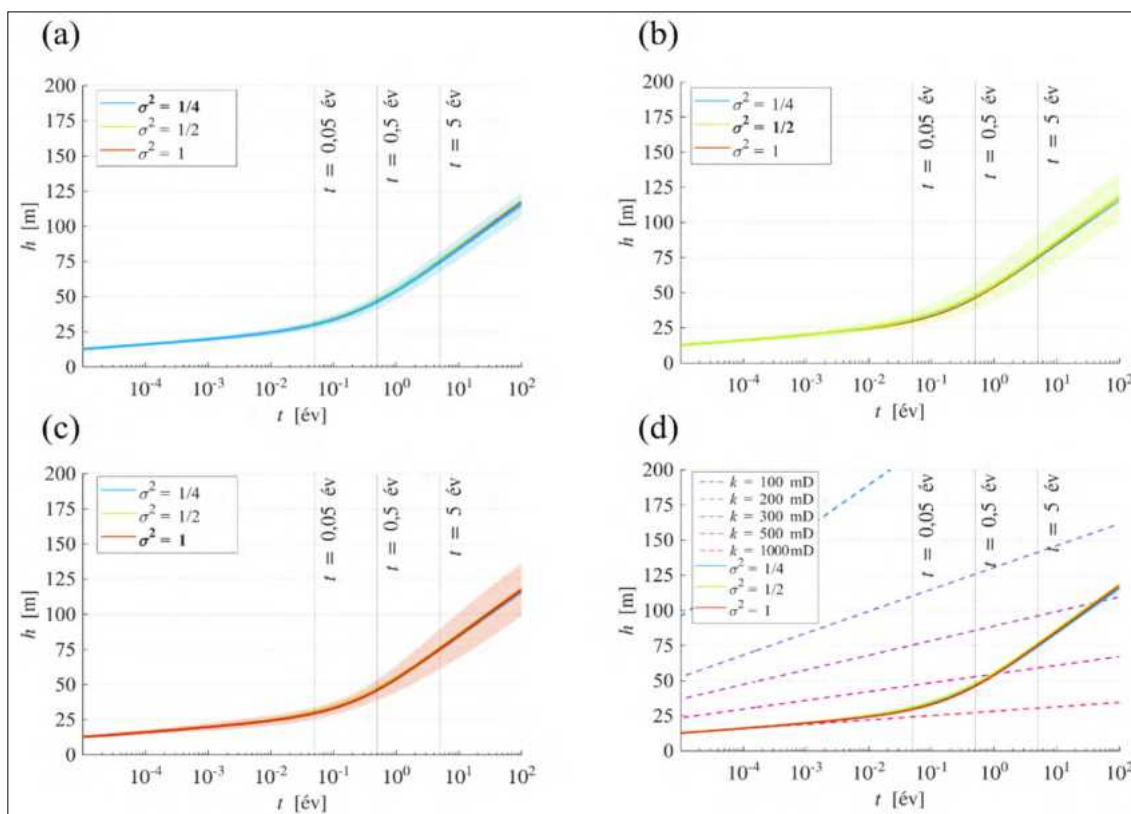
A heterogenitás szórásának hatása

A paramétervizsgálat során három különböző szórás-négyzetértéket tanulmányoztunk, melyek befolyásolják a lognormális permeabilitáseloszlás szélességét, szélső értékeinek gyakoriságát. A szisztematikus vizsgálat során $\sigma^2 = 0,25, 0,5$ és 1 volt, így az utóbbi érték esetén több nagyobb, illetve kisebb permeabilitású zóna alakul ki. Másrésztől, ahogy a szórásnégyzet zérushoz tart, a rezervoár közelít a homogén modellhez (2. ábra, függőleges tengely). Megjegyezzük, hogy $\sigma^2 = 1$ variancia mellett $k = 1000$ mD permeabilitásnál a rezervoár 16%-a nagyobb

permeabilitású, míg $\sigma^2 = 0,25$ esetén ez az érték már csupán 2,3%.

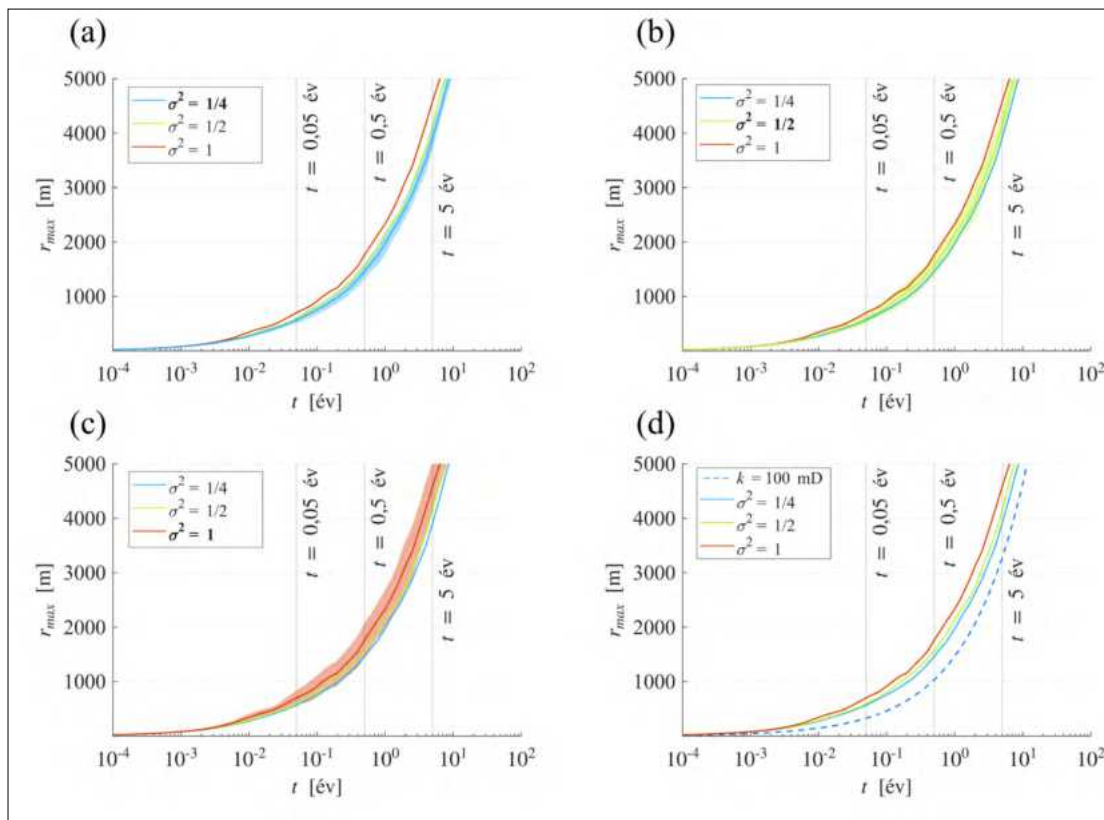
Az eltérő szórásnégyzetek esetén kialakuló áramlási pályákat a 8. ábra szemlélteti, egy kisebb ($\sigma^2 = 0,25$) és egy nagyobb ($\sigma^2 = 1$) szórásnégyzettel rendelkező permeabilitáseloszlás-realizáción keresztül. Magasabb szórásnégyzet esetén a nagy permeabilitású csatornákon keresztül intenzívebb áramlás alakul ki, azok geometriáját erőteljesebben követik az áramlási útvonalak. Emiatt az útvonalak kanyargósabbak, tekervényességük nagyobb, kevésbé hajlamosak áthaladni a kisebb permeabilitású közegeken.

A kútban kialakult átlagos hidraulikus emelkedési magasság idősorait különböző σ^2 szórásnégyzet mellett a 9. ábra érzékelteti. A 20 realizációra számított átlagos h értékek mellett azok szórását is feltüntettük – a jobb átláthatóság kedvéért – külön alábrákon (9a.–c. ábra). Számításaink alapján a kútban kialakult üzemi vízszintre alig van hatással a permeabilitáseloszlás szórása, a három vizsgált modell átlagai gyakorlatilag átfednek (9d. ábra). A h idősorok viselkedését (meredekségének változását) az előző alfejezetben már tárgyaltuk, így arra most nem térünk ki. Ugyanakkor egyértelmű, hogy az egyes permeabilitás-realizációk közötti eltérés növekszik σ^2 szórásnégyzettel, a szórásáv kiszélesedik (9a.–c. ábra).



9. ábra A heterogenitás szórásnégyzetének (σ^2) hatása a kútban tapasztalt hidraulikus emelkedési magasság időbeli változására. A 20 heterogén permeabilitásrealizáció átlaga és szórása (a) $\sigma^2 = 0,25$, (b) $\sigma^2 = 0,5$ és (c) $\sigma^2 = 1$ esetén. (d) Az átlagolt h értékek idősorai a homogén referenciagörbékkel kiegészítve

Figure 9 Effect of the variance of the heterogeneity (σ^2) on the calculated well head time series. Graphs show the averaged results of 20 heterogeneous permeability realizations and their standard deviations for (a) $\sigma^2 = 0,25$, (b) $\sigma^2 = 0,5$ and (c) $\sigma^2 = 1$, respectively. (d) Averaged results for each σ^2 , with 5 homogenous model results



10. ábra A heterogenitás szórásnégyzetének (σ^2) hatása a nyomásfront maximális távolságának időbeli változására. A 20 heterogén permeabilitásrealizáció átlaga és szórása (a) $\sigma^2 = 0,25$, (b) $\sigma^2 = 0,5$ és (c) $\sigma^2 = 1$ esetén. (d) Az átlagolt r_{max} értékek idősorai a homogén referenciagörbével kiegészítve

Figure 10 Effect of the variance of the heterogeneity (σ^2) on the maximum distance of the pressure front. Graphs show the averaged results of 20 heterogeneous permeability realizations and their standard deviations for (a) $\sigma^2 = 0.25$, (b) $\sigma^2 = 0.5$ and (c) $\sigma^2 = 1$, respectively. (d) Averaged results for each σ^2 , with one homogenous reference model result

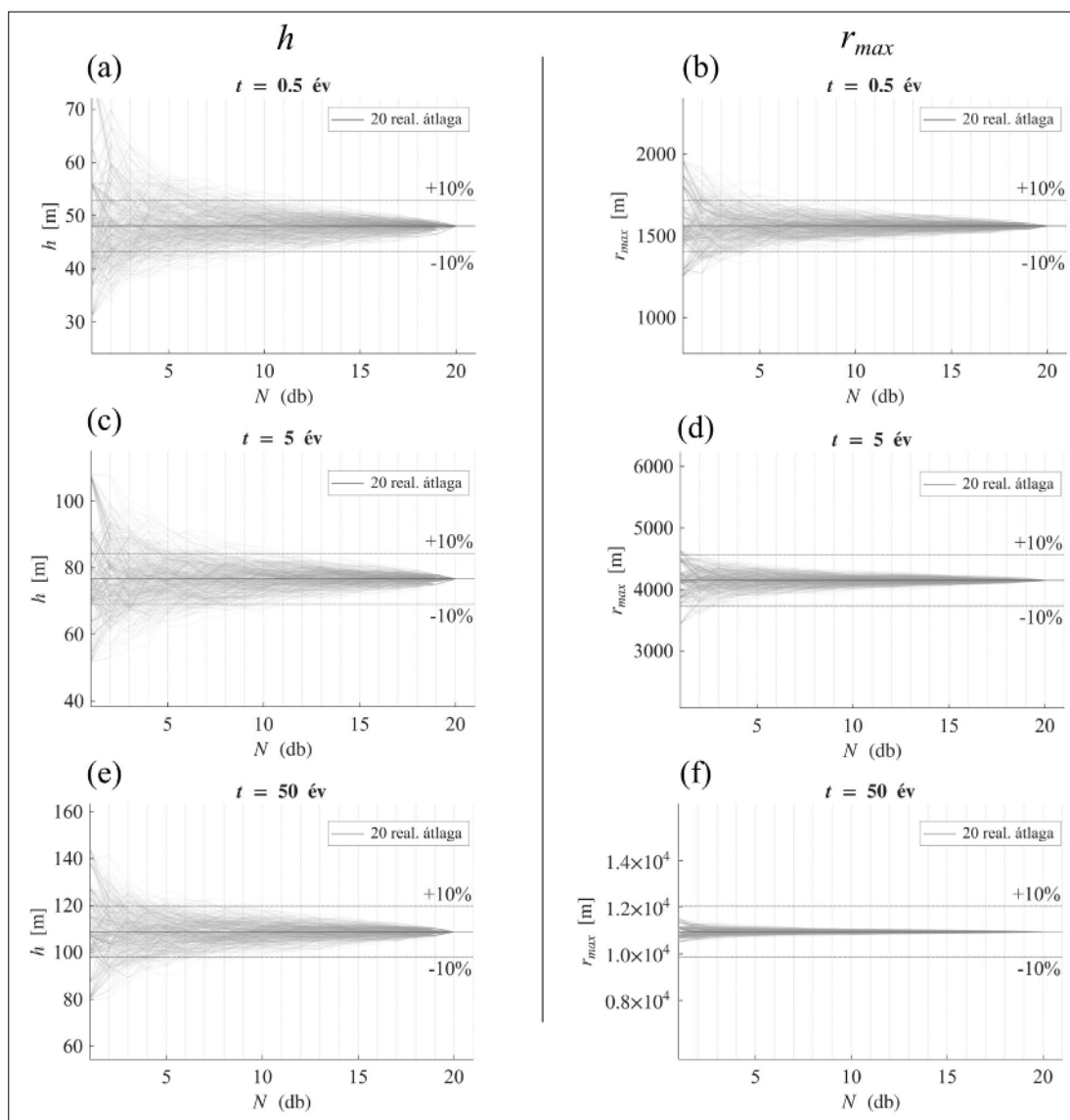
A permeabilitáseloszlás varianciája erőteljesebben befolyásolja a nyomásfront maximális távolságát (10. ábra), mint a kútban kialakuló hidraulikus emelkedési magasságot, mely egyfajta integrált hatása a teljes rendszernek, rezervoárnak. Nagyobb szórásnégyzet esetén az injektáló kút távolhatása is nagyobb, a nyomásfront a jobb permeabilitású, egymással összeköttetésben lévő csatornákon keresztül gyorsabban terjed. Könnyen elfogadható eredmény, hogy a permeabilitáseloszlás szórásnégyzetének növelése (szélesebb permeabilitástartomány) a távolhatás szórását is megemeli. Másik oldalról tekintve, kisebb szórásnégyzet esetén r_{max} értékei közelebb állnak a rezervoár átlagos permeabilitásának megfelelő homogén megoldáshoz ($k = 100$ mD).

Diszkusszió

Az eredmények statisztikai robusztussága

Sztochasztikusan heterogén közegben történő numerikus vizsgálat esetén mindig elsőrendűen fontos feladat annak megállapítása, hogy a megoldások statisztikai értelemben mennyire robusztusak. Ennek elérésére minden (R , σ^2) modellparaméter esetén 20 szimulációt végeztünk egyedi, de statisztikailag megegyező permeabilitáseloszlás fel-

használásával. Kiszámítottuk a vizsgált értékek átlagát $N = 1, 2, 3, \dots, 20$ realizációt figyelembe véve úgy, hogy a realizációk sorrendjét véletlenszerűen határoztuk meg. A 11. ábra a 20(!) lehetőség közül 400 különböző sorrend szerint mutatja h (bal oszlop), illetve r_{max} (jobb oszlop) átlagait N figyelembe vett realizációk függvényében különböző időpillanatokban. Megállapítható, hogy $N = 5$ átlagolt realizáció esetén a számított h átlagértékek 10–15%-kal is eltérhetnek a 20 realizáció átlagától, viszont $N = 15$, illetve 19 realizáció figyelembevételénél a tapasztalt eltérés (az eltelt időtől függően) csupán ± 5 –8%, illetve ± 2 –3%, míg r_{max} esetén pedig csupán ± 1 –1,5%. A teljesség kedvéért megemlítjük, hogy 50 év elteltével a nyomásfront távolsága meghaladja a heterogén rezervoár $R_{in} = 5$ km sugarát, ami hozzájárul az egyes realizációk közötti különbség mérsékléséhez (v.ö. 7. és 10. ábra). Összességében kijelenthető, hogy a realizációk számának növekedtével az eredmények szórása csökken, nagyobb szimulációs idő esetén a csökkenés mértéke gyorsabb. Az utóbbi jelzi, hogy az idő múlásával a heterogenitás mérete csökken a nyomásfront távolságához képest (R/r_{max}), így a modelleredmény tart a homogén megoldáshoz. Bár több realizáció kétségtelenül növelné az eredmény pontosságát, a konvergenciavizsgálat alapján 20 db realizáció már elegendő a szignifikáns következtetések levonására.



11. ábra A sztochasztikus permeabilitásrealizációk konvergenciavizsgálata a kútban észlelt hidraulikus emelkedési magasságra (bal oszlop) és a nyomásfront maximális távolságára (jobb oszlop) három időpillanatban, (a)–(b) $t = 0,5$ év, (c)–(d) $t = 5$ év és (e)–(f) $t = 50$ év. Az ábrák egyre növekvő számú realizáció (N) figyelembevételével számított átlagokat jelenítenek meg 400, véletlenszerűen választott realizációsrendet esetén. A vízszintes vonalak az $N = 20$ realizáció átlagát, illetve az attól való $\pm 10\%$ -os relatív eltérést mutatják

Figure 11 Convergence analysis of the stochastic permeability realizations for the well head (left column) and the maximum distance of the pressure front (right column) at times of (a)–(b) $t = 0.5$ yr, (c)–(d) $t = 5$ yr and (e)–(f) $t = 50$ yr. The graphs show the averages as a function of the number of realizations (N) included for 400 random permutations. Horizontal solid lines show the average of the 20 realizations, dotted lines illustrate $\pm 10\%$ difference from the average

A kútban tapasztalt nyomásnövekedés

Vizsgálatunk során egy horizontálisan kétdimenziós modellt építettünk fel (1. ábra) azzal a céllal, hogy számszerűsítsük egy visszajutó kútban, illetve a környező heterogén rezervoárban indukált nyomásnövekményt. Az SGS módszerrel generált heterogén permeabilitású közegekben áramlásszimulációt végeztünk, majd az alapmodell mellett a heterogenitás skálájának és a szórásnégyzetének hatását is vizsgáltuk (1. táblázat).

A kútban kialakuló hidraulikus emelkedési magasságra vonatkozó eredményeink a közeli nagy permeabilitású tartomány méretének hatását mutatják. Ahogy a nyomás-

front eléri az alacsonyabb permeabilitású zónákat, meg-növekedett ütemű nyomásnövekedés tapasztalható a kútban. A kiugró nyomásnövekedés kezdeti ideje erősen függ a heterogenitás skálájától, nagyobb R érték esetén ez később következik be. Minden modellszenárió esetén fennáll, de kiemelten az $R \geq 500$ m modelleknél, hogy a nyomásnövekmény megjelenési ideje jelentősen túlmutat a gyakorlatban elterjedt 2–8 óra hosszúságú kúttesztek időtartamán. A kút hosszúidejű működtetésére vonatkozó effektív permeabilitását így lényegesen túlbecsülheti egy rövid kútteszt, s így a fenntartható működésre jellemző paraméterek már csak a hosszú távú működés során derülhetnek ki. Az üzemszerű működtetés során gyakorta fel-

merülő injektivitás csökkenését a legtöbb esetben a kút-környéki, mérnöki problémák számlájára könyvelik el (Luo et al. 2023), azonban eredményeink rávilágítanak arra, hogy ebben jelentős szerepet játszhat a rezervoár korlátozott horizontális kiterjedése is, melyen a működtetés során már nincs lehetőség javítani. Emiatt és a visszasajtolást nehezítő problémák egymásra rakódása miatt fontos, hogy a visszasajtoló kutat a lehető legideálisabban pozícionálják, illetve a legmegfelelőbb rétegeket/tartományokat/lencsüket szűrőzzék. Ehhez az ideális tulajdonságú homokkőtestek lehatárolását még a fúrás kezdete előtt ajánlott elvégezni, hogy ennek ismeretében indulhasson el az adott projekt. A rezervoár homoktestek felszíni geofizikai módszerekkel történő lehatárolása nyitott probléma, kiterjedésük meghatározásának egyik lehetséges módja a 3D szeizmikus mérések szeizmikus attribútumainak elemzése és kombinálása kútszelvényeken végzett fácies-és szekvenciakorrelációval (Ben Mahrez et al. 2023, Markó et al. 2024, Willems et al. 2019, Molnár et al. 2026).

A heterogenitás skálájának növelésével általánosságban csökkennek a kútban tapasztalt h értékek, ami könnyebb visszasajtolást eredményez. Nagyobb R esetén a kiugró nyomásnövekedés is később jelentkezik. Tehát az üzemi vízszint idősorainak meredeksége a korai szakaszban a kútközeli nagy permeabilitású zónára, míg a kései szakaszban a heterogén rezervoár átlagos permeabilitására jellemző. Mindezeket figyelembe véve megállapítható, hogy nagyobb heterogenitási skála esetén tartósan alacsonyabb üzemi vízszint alakul ki, ami jelentősen kevesebb energiabefektetést igényel az injektáló kút működtetése során. Eredményeink egybevágóak Crooijmans et al. (2016) munkájával, amelyben a kútban észlelt nyomásnövekedést és a visszasajtoláshoz szükséges megnövekedett energiaigényt alacsony N/G (net-to-gross, homok/agyag arány) értékekhez kapcsolták; kis N/G esetén romlott a jó vezetőképeségű tartományok konnektivitása. Major és mtsai (2023) is hasonló jelenséget mutattak ki, illetve megállapították, hogy a heterogenitást sztochasztikus módszerekkel figyelembe vevő modellek valamivel magasabb átlagos nyomásértékeket mutatnak a heterogenitást az üledékes fáciesek folyamatalapú modellezésével figyelembe vevő modellekhez képest.

A rezervoár heterogén permeabilitáseloszlásának szórásnégyszete – az előzetes várakozással szemben – nem befolyásolta szignifikánsan a kútban tapasztalt nyomásgörbét, bár nagyobb σ^2 esetén az eredmények is nagyobb szórást mutattak. Nagyobb szórásnégyszet mellett a jobb vezetőképeségű tartományokat gyengébb vízfogó zónák veszik körül, így a felépített modellünkben ez a hatás kiegyenlítődni látszik.

A visszasajtoló kút távolhatása

A nyomásfront terjedését két kontrollparaméterrel, a $h = 1$ m növekedéshez tartozó r_{min} és r_{max} , minimális és maximális távolság segítségével számszerűsítettük. Általánosságban a nyomásfront igen gyorsan terjed, a $h = 1$ m

küszöbérték a heterogenitás skálájától függően 5–10 év alatt eléri az 5 km távolságot, a heterogén tartomány határát. A nyomásfront jelentősen gyorsabban terjed, mint az oldott anyag (Molnár et al. 2026), vagy akár a hőmérséklet (Molnár és Galsa 2022) frontja, mivel a folyadékrezekcéknek nem kell elmozdulniuk, s a konduktió sem lassítja a transzportfolyamatot. Emiatt fontos a visszasajtoló kutak védőidomának meghatározása során tisztában lenni, hogy pontosan mely fizikai paraméter (nyomás, koncentráció vagy hőmérséklet) elérési idejéről beszélünk, illetve, hogy ezek jelentősen eltérő védőidom-távolságot jelenthetnek. A nyomásfront evolúcióját a rezervoárra jellemző fajlagos tározási tényező értéke is befolyásolja ((2) egyenlet), melyet modellünkben egy sziliciklasztos tározó átlagértékének megfelelően választottunk (Chowdhury et al. 2022).

A heterogenitás skálájának növelése alapvetően növelte mind a maximális, mind a minimális távolhatást a nagy permeabilitású kútközeli tartománynak köszönhetően. Míg R csökkentésével a távolhatás fokozatosan közelített a homogén megoldáshoz. A permeabilitáseloszlás varianciájának növelésével is növekedett a maximális távolhatás, mivel az összeköttetésben lévő nagy permeabilitású csatornák még intenzívebb áramlást tettek lehetővé. Mind nagyobb heterogenitási skála, mind nagyobb szórásnégyszet esetén megfigyelhető volt, hogy a maximális és minimális távolhatás közötti különbség megnövekedett, míg R és σ^2 csökkenésével mindkét érték a homogén esethez közelített.

Modell-limitációk

A numerikus vizsgálat során felépített modell – mint minden modell – számos közelítést tartalmaz, mely kisebb-nagyobb mértékben képes befolyásolni a szimuláció eredményeit. Kétdimenziós közelítéssel éltünk, azaz a rezervoár vertikális heterogenitását nem vettük figyelembe, mivel a 3D modellben végzett időfüggő számítások időigénye – főképp a számos sztochasztikus permeabilitásrealizáció miatt – egyelőre megoldhatatlan problémát jelent a jelenlegi számítástechnikai lehetőségek mellett. Az egyszerűség kedvéért a rezervoárt ágyazó réteget tökéletes vízzárónak tekintettük, pedig valós környezetben ezeken a tartományokon át is áramolhat kis mennyiségű fluidum, így valamelyest csökkentve a tapasztalt nyomásértékeket. Az ágyazó rétegek permeabilitásának figyelembevétele egy újabb paraméter vizsgálatát jelentette volna a szimulációsorozatban. A tanulmány során mind a víz viszkozitását, mind a víz sűrűségét állandónak tekintettük, hogy a rezervoár heterogenitásának hatását állítsuk a célkeresztbe. Ugyanakkor a visszasajtoló víz alacsonyabb hőmérséklete miatt annak sűrűsége és dinamikus viszkozitása is megnő, ami kis mértékben módosíthatja az elvégzett számítások eredményeit (pl. Galsa et al. 2025). A sztochasztikus permeabilitásrealizációkat SGS módszerrel generáltuk, azonban több egyéb módszer is létezik, mely elfogadott közelítését adja a sziliciklasztos környezeteknek,

így célunk a jövőben a Szekvenciális Indikátor Szimuláció vizsgálata, illetve a két módszer eredményeinek összehasonlítása. Mindemellett modellünk egyetlen visszajelző kutat vett figyelembe, habár valós környezetben termelő és visszajelző kútpárok (doubletek) vagy komplex kúttrendszerek létesülnek. Ennek oka, hogy elsősorban a rezervoár heterogenitásának hatására voltunk kíváncsiak, melynek szerepe egy egyszerűbb hidraulikai környezetben sokkal hatékonyabban tanulmányozható.

Kútpárok pozicionálása a heterogenitások figyelembevételével

A sziliciklasztos víztartó heterogenitásoknak kútpárként történő együttes működés esetén szintén nagy jelentősége van. Termelőkút jelenléte esetén a termelőkút irányában a nyomásnövekedés kisebb mértékű lenne, ami megnövelné az áramlás intenzitását az adott irányban. Amennyiben jó összeköttetésben áll a két kút, alacsonyabb nyomásváltozás lép fel mindkét kútban, ez alacsonyabb energiabefektetést igényel, ami így a működés szempontjából előnyös. Azonban, a túlzottan direkt összeköttetés növeli a termikus áttörés kockázatát, melynek következtében csökkenhet a kinyerhető energia mennyisége és a kútpár élettartama (Molnár et al. 2025, Willems et al. 2017). Éppen ezért egy optimális geotermikus rendszer tervezése során a termelő- és visszajelző kutak olyan pozicionálására van szükség, amely a rezervoár heterogenitását is figyelembe veszi, így a jó hidraulikus kapcsolat révén hatékony működést eredményez, de a megfelelően megválasztott kútpártávolság révén a termikus áttörést még elkerüli.

Következtetések

Tanulmányunkban egy sztochasztikusan heterogén permeabilitáseloszlású rezervoárba telepített visszajelző kút működését vizsgáltuk a kútban kifejlődő nyomásemelkedés és a kútkörnyezetben fellépő nyomásfront időbeli folyamataira. Az alapmodell felépítése után a heterogenitás skálájának (R), illetve szórásnégyzetének (σ^2) szisztematikus módosításából eredő hatását elemeztük, minden esetben 20–20 permeabilitásrealizáció felhasználásával. A realizációkon numerikus áramlásmodellezést végeztünk, az elért legfontosabb számszerű eredmények a következők.

- Az alapmodellben ($R = 500$ m, $\sigma^2 = 0,5$) a kútban számított hidraulikus emelkedési magasság (h) időbeli változása eleinte a $k = 1000$ mD homogén modell eredményét követi, majd ahogy a nyomásfront elhagyja a kútközelit nagyobb permeabilitású zónát, intenzívebb nyomásnövekedés következik be a kútban. Ezután a nyomásnövekedés mértéke megegyezik a heterogén rezervoár átlagos permeabilitásának megfelelő homogén modellel ($k = 100$ mD), viszont a teljes időtartományon annál jelentősen kisebb hidraulikus emelkedési magasság tapasztalható.

- A heterogenitás skálájának növelésével – mely nagyobb homok- és agyagtesteket jelent – a kútbeli h értékek általánosan csökkennek, annak intenzív növekedési fázisa később kezdődik a nagyobb méretű permeabilis tartománynak köszönhetően. Nagyobb R esetén a maximális távolhatás is nagyobb lesz, a hidraulikusan jól vezető csatornák mentén a nyomásfront gyorsabban terjed.
- A heterogenitás szórásnégyzetének változtatása – mely egyaránt gyakoribb kisebb és nagyobb permeabilitású zónát jelent – az általunk felépített modellben nincs jelentős hatással a kútban tapasztalt nyomásviszonyokra. A nagyobb szórásnégyzet a távolhatás kontrollparamétereit a szélső értékek felé tolja, így a nyomásfront maximális távolhatása nagyobb, míg a minimális távolhatás kisebb lesz.

Kiemelendő továbbá, hogy bár a visszajelzős során bekövetkező nyomásemelkedést vizsgáltuk, a fizikai jelenség nem kizárólag a visszajelzősra érvényes. Termelőkutak esetén a jelenség ugyanilyen formában, de ellentétes előjellel jelenik meg, így a heterogenitás skálájának és szórásnégyzetének függvényében időben késleltetett nyomáscsökkenés léphet fel, ami a vízkitermelés során okozhat problémát. Kutatásunk elősegíti a nyomás terjedésének heterogén közegben történő fizikai megértését, mely hozzájárulhat a geotermikus projektek kockázatának csökkentéséhez. Nem megfelelő előzetes geofizikai és földtani felmérés, illetve mellőzött numerikus vizsgálat esetén a visszajelző kútban injektivitási problémák jelentkezhetnek, ami veszélyeztetheti akár a teljes projekt sikerességét. Kiemelten fontosnak tartjuk a projektek által célzott geológiai környezetek rezervoár léptékű permeabilitásviszonyainak figyelembevételét, hiszen a jelentős mértékű heterogenitás befolyásolja a homokosabb, jó permeabilitású zónák méretét, illetve azok összeköttetését (konnektivitását). A tapasztalt problémák valószínűsége csökkenthető a kutak üzembehelyezését megelőző kúttesztek idejének kiterjesztésével, a becsült heterogenitási skála függvényében pár nap – egy hét időtartamra. Mindenképpen javasoljuk emellett a felszíni geofizikai és földtani kutatásokat támogató előzetes numerikus modellezés elvégzését is, mely költséghatékony módon adhat becslést a kútban és környezetében várható nyomásviszonyokra.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők hálásan köszönik Kun Éva és Székvölgyi Katalin bírálók hasznos és segítőkész észrevételeit, melyek hozzájárultak a bemutatott eredmények pontosításához, így egyben javították a cikk érthetőségét.

A tanulmány szerzői

Nagy Bence, Markó Ábel, Galsa Attila, Molnár Bence

Hivatkozások

- Babaei M., Nick H. M. (2019): Performance of low-enthalpy geothermal systems: Interplay of spatially correlated heterogeneity and well-doublet spacings. *Applied Energy*, 253, 113569. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113569>
- Bálint A., Szanyi J. (2015): A half century of reservoir property changes in the Szentes geothermal field, Hungary. *Central European Geology*, 58(1–2), 28–49. <https://doi.org/10.1556/24.58.2015.1-2.2>
- Békési E., Lenkey L., Limberger J., Porkoláb, K. Balázs A., Bonté D., Vrijlandt M., Horváth F., Cloetingh S., Van Wees J.-D. (2018): Subsurface temperature model of the Hungarian part of the Pannonian Basin. *Global and Planetary Change*, 171, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.09.020>
- Ben Mahrez H., Márton P., Márton B., Mádl Szőnyi J., Kovács J., Sztanó O. (2023): Hydrostratigraphic decomposition of fluvio-deltaic sediments inferred from seismic geomorphology and geophysical well logs in the Pannonian Basin, Hungary. *Global and Planetary Change*, 230, 104285. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104285>
- Bianchi M., Zheng C. (2009): SGEMS: A free and versatile tool for three-dimensional geostatistical applications. *Groundwater*, 47(1), 8–12. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00522.x>
- Budai S., Willems C. J. L., Colomera L., Westaway R. (2024): Influence of sedimentary architecture on static connectivity and geothermal doublet performance (Mezőberény, SE Hungary). *Marine and Petroleum Geology*, 164, 106820. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106820>
- Chowdhury F., Gong J., Rau G. C., Timms W. A. (2022): Multi-factor analysis of specific storage estimates and implications for transient groundwater modelling. *Hydrogeology Journal*, 30(7), 2183–2204. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02535-z>
- Cooper H. H., Jr., C. E. Jacob (1946): A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Eos Trans. AGU*, 27(4), 526–534. <https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526>
- Croijmans R. A., Willems C. J. L., Nick H. M., Bruhn D. F. (2016): The influence of facies heterogeneity on the doublet performance in low-enthalpy geothermal sedimentary reservoirs. *Geothermics*, 64, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.004>
- Deutsch C. V. (2014): *Geostatistical Reservoir Modeling* (M. Pyrcz, ed.; 2nd edition). Oxford University Press.
- Eaton T. T. (2006): On the importance of geological heterogeneity for flow simulation. *Sedimentary Geology*, 184(3–4), 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.002>
- Galsa A., Szijártó M., Tóth Á., Mádl-Szőnyi J. (2025): Topothermal convection – from synthetic simulations to reveal processes in a thick geothermal system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(17), 4281–4305. <https://doi.org/10.5194/hess-29-4281-2025>
- Geiger J. (2006). Szekvenciális gaussi szimuláció az övzónytestek kisléptékű heterogenitásának modellezésében. *Földtani Közlöny*, 136(4), 527–546.
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., Koroknai B., Pap N., Tóth T., Wörum G. (2015): Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53, 328–352. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009>
- Koroncz P., Vízahányó Z., Farkas M. P., Kuncz M., Ács P., Kocsis G., Mucsi P., Fedorné Szász A., Fedor F., Kovács J. (2022): Experimental rock characterisation of upper Pannonian sandstones from Szentes geothermal field, Hungary. *Energies*, 15(23), 9136. <https://doi.org/10.3390/en15239136>
- Lenkey L., Mihályka J., Paróczy P. (2021): Review of geothermal conditions of Hungary. *Földtani Közlöny*, 151(1), 65. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.65>
- Luo W., Kottsova A., Vardon P. J., Dieudonné A. C., Brehme M. (2023): Mechanisms causing injectivity decline and enhancement in geothermal projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113623>
- Mádl-Szőnyi J., Markó Á., Tóthi T. (2024): Nem lehet mindenhol mindent, de mindenhol lehet valamit – A geotermikus energia hasznosításának lehetőségei a hazai ellátás diverzifikálása érdekében. *Scientia et Securitas*, 4(3), 153–168. <https://doi.org/10.1556/112.2023.00198>
- Major M., Daniilidis A., Hansen T. M., Khait M., Voskov D. (2023): Influence of process-based, stochastic and deterministic methods for representing heterogeneity in fluvial geothermal systems. *Geothermics*, 109, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102651>
- Markó Á., Mádl-Szőnyi J., Brehme M. (2021): Injection related issues of a doublet system in a sandstone aquifer – A generalized concept to understand and avoid problem sources in geothermal systems. *Geothermics*, 97, 102234. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102234>
- Markó Á., Tóth M., Mádl-Szőnyi J. (2024): Termákvíz-visszasajtolás és fenntarthatóság – a visszasajtolási potenciál előrejelzési lehetőségei homokkő rezervoárok esetén. *Scientia et Securitas*, 5(2), 199–210. <https://doi.org/10.1556/112.2024.00200>
- Molnár B., Galsa A. (2022): Felszín alatti vízáramlás és hőtranszport sztochasztikus permeabilitású közegekben. *Magyar Geofizika*, 63(1), 22–33.
- Molnár B., Lenkey L., Pedretti D., Mádl-Szőnyi J., Galsa A. (2025): Elucidating the relationship between aquifer heterogeneity and thermal dispersivity using stochastic heat transport simulations. *Hydrogeology Journal*, 33(2), 493–513. <https://doi.org/10.1007/s10040-025-02875-6>
- Molnár B., Pedretti D., Garaguly I., Varga G., Mádl-Szőnyi J., Galsa A. (2026): Effects of reservoir permeability heterogeneity on the size of solute and thermal protection zone around a geothermal reinjection well in a porous reservoir, Hungary. *Geothermics*, *Benyújtott kézirat*.
- Nádor A., Lenkey L. (2026): *Geothermal resources of Hungary: A play-based review*. Geological Society, London, Special Publications, 555(1), SP555-2024–2043. <https://doi.org/10.1144/SP555-2024-43>
- Njeru R. M., Halisch M., Szanyi, J. (2024): Micro-scale investigation of the pore network of sandstone in the Pannonian Basin to improve geothermal energy development. *Geothermics*, 122, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103071>
- Szabó Z., Szijártó M., Tóth Á., Mádl-Szőnyi J. (2023a): The significance of groundwater table inclination for nature-based replenishment of groundwater-dependent ecosystems by managed aquifer recharge. *Water*, 15(6), 1077. <https://doi.org/10.3390/w15061077>
- Szabó F., Sztanó O., Sebe K. (2023b): Dél-zselici pannon-tavi (késő miocén) rétegsorok öskörnyezeti rekonstrukciója. *Földtani Közlöny*, 153(1), 35–56. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2023.153.1.35>

- Szanyi J., Kovács B. (2010): Utilization of geothermal systems in South-East Hungary. *Geothermics*, 39(4), 357–364. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.004>
- Szanyi J., Medgyes T., Kóbor B., Pál-Molnár E. (2015): Technologies of injection into sandstone reservoirs: Best practices, case studies. *GeoLitera*; Institute of Geosciences, University of Szeged.
- Szanyi J., Nádor A., Madarász T. (2021): A geotermikus energia kutatása és hasznosítása Magyarországon az elmúlt 150 év tükrében. *Földtani Közöny*, 151(1), Article 1. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2021.151.1.79>
- Székely F., Galsa A. (2006): Interpretation of transient borehole flow metering data in a fissured granite formation. *Journal of Hydrology*, 327(3–4), 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.033>
- Sztanó O., Balázs A., Bartha I. R., Ben Mahrez H., Horányi A., Kovács Á., Šujan M., Tőkés L., Törő B., Vallner F., Varga G., Magyar I. (2026): Sedimentology, lithostratigraphy, palaeogeography and water level changes in a lacustrine basin: The depositional model of Lake Pannon. *Geological Society, London, Special Publications*, 554(1), SP554-2024–2072. <https://doi.org/10.1144/SP554-2024-72>
- Ungemach P. (2003): Reinjection of cooled geothermal brines into sandstone reservoirs. *Geothermics*, 32(4–6), 743–761. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00074-9)
- Várkonyi D. (2019): Újfalui Formációba tartozó szénhidrogéntárolók újraértelmezése Üllésen [Reinterpretation of hydrocarbon reservoirs of the Újfalú Formation at Üllés]. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Willems C. J. L., Cheng C., Watson S. M., Minto J., Williams A., Walls D., Milsch H., Burnside N. M., Westaway R. (2021): Permeability and mineralogy of the Újfalú Formation, Hungary, from production tests and experimental rock characterization: Implications for geothermal heat projects. *Energies*, 14(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/en14144332>
- Willems C. J. L., Nick H. M., Donselaar M. E., Weltje G. J., Bruhn D. F. (2017): On the connectivity anisotropy in fluvial Hot Sedimentary Aquifers and its influence on geothermal doublet performance. *Geothermics*, 65, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.002>
- Willems C. J. L., Westaway R., Burnside N. M. (2019): Hydraulic connectivity in Pannonian sandstones of the Mezőberény geothermal doublet. *European Geothermal Congress 2019*.
- Witter J. B., Trainor-Guitton W. J., Siler D. L. (2019): Uncertainty and risk evaluation during the exploration stage of geothermal development: A review. *Geothermics*, 78, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.011>
- Zimmerman W. B. J. (2010): *Multiphysics Modelling with Finite Element Methods*. World Scientific.

Feldolgozások a dunántúli MTOA-03 (CEL08) magnetotellurikus alapszelvény mentén

KISS J.[@], SZEKENYI R. M.

Szabályzott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Igazgatóság,
1123 Budapest, Alkotás utca 50.
[@]E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

A korábbi DKH-1, SB-5, MV-2 szelvények és a litoszférakutató CEL08 szeizmikustomográfia-szelvény mentén végzett új magnetotellurikus szondázások alkotják az MTOA-03 szelvényt, amelyek a Kisalföld, a Dunántúli-középhegység (Balaton-felvidék), Dunántúli-dombság és a Mecsek-Mórágysziget-hegység fizikai paramétereinek vízszintesen és függőlegesen bekövetkező változásait vizsgálják. Megtalálhatók a szelvény mentén az Alpokalja metamorf képződményei, a középhegységi vonulat paleozoos és mezozoos üledékes kőzetei és a Balaton-felvidéken a köpenyzárványokat felszínre hozó pannon bazaltvulkanizmus termékei is.

Az MTOA-03 szelvény nyomvonalában gravitációs, mágneses és szeizmikus mérési adatok is rendelkezésre álltak, így a sűrűség, mágnesezettség, szeizmikus sebesség mellett az elektromos fajlagosellenállás- és fázisparamétert is be tudtuk vonni a kéregsztű vizsgálatokba, azaz a komplex geofizikai értelmezésbe.

Kiss, J, Szekenyi, R. M.: The Transdanubian MTOA-03 magnetotelluric profile

The MTOA-03 (CEL08) profile examines the horizontal and vertical variations in the physical parameters of the Kisalföld, the Transdanubian Central Mountains (Balaton Highlands), the Transdanubian Hills, and the Mecsek-Mórágysziget island range. Pannonian basaltic volcanism bring mantle intrusions into the surface, it also appears, as witness peaks, along the section.

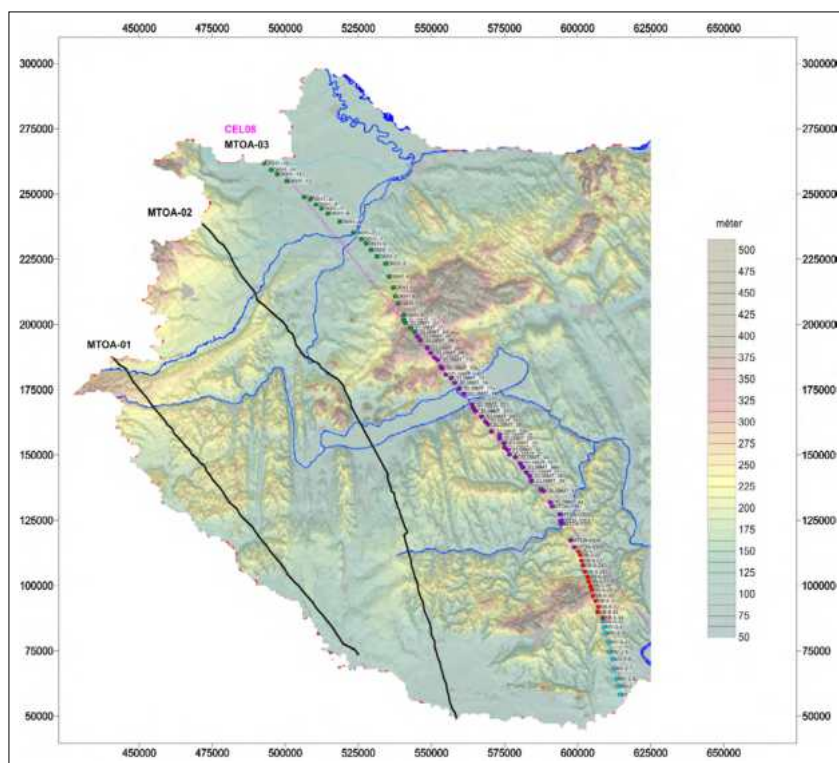
Gravity, magnetic, and seismic data were also available along the MTOA-03 profiles, so in addition to density, magnetization, and seismic velocity, we were able to include the electrical resistivity and phase parameters in the investigation of the crust, i.e., in the complex geophysical interpretation.

Beérkezett: 2026. április 23.; *elfogadva:* 2026. június 11.

Bevezetés

A Magyar Geofizikában közölt korábbi tanulmányainkban ismertettük az MTOA-01 (vagy CEL07) és MTOA-02 magnetotellurikus (MT) alapszelvényeket (Kiss, Szekenyi 2023, Szekenyi et al. 2024, Kiss et al. 2024). Ezek a szelvények a Dunántúltól közel É–D irányban átszelő archív MT mérési adatokból összeszerkesztett, regionális elektromágneses alapszelvények (1. ábra), amelyek közel merőlegesen metszik a nagyszerkezeti vonalakat (Rába-vonal, Középmagyarországi-vonal és Mecsek-alja-vonal).

2000-ben mérték le a CEL08 szeizmikus litoszférakutató szelvényt (Gúthy et al. 2000, Fancsik et al. 2001, Kiss 2009) a Hanságtól Tihanyon keresztül Mohácsig (1. ábra). A szeizmikus szelvény mentén, közvetlenül a szeizmikus mérések után, nem történtek magnetotellurikus mérések egészen 2015-ig, amikor elkezdtük a terepi MT méréseket. Az archív adataink alapján a szelvény elejét ki tudtuk váltani a DKH-1 szelvényvel, ami a CEL08 nyomvonalához nagyon közel mérődött le még 1983-ban.



1. ábra | MTOA alapszelvények és az MTOA-03 szelvény magnetotellurikus szondázásai a domborzati térképen. (DKH-1 – zöld, CEL08 – lila, SB-5 – piros, MV-2 – világoskék pontokkal)

Figure 1 | MTOA base profiles and the MTOA-03 magnetotelluric soundings on the topographic map. (DKH-1 – green, CEL08 – purple, SB-5 – red, MV-2 – light blue dots)

A CEL08 szelvény további, D-i folytatásában történtek újabb MT mérések 2015–2024 között a Balaton-felvidéken és a Közép-magyarországi Zónában. A szelvény D-i részén is voltak archiv mérési adatok, amelyeket felhasználtunk. Ilyenek voltak például az SB-5 és az MV-2 magnetotellurikus szelvények (Kiss J., Varga G. 2003). Az SB-5 szelvény első 20 pontjának adatai elvesztek, ezért ott újabb terepi mérésekre volt szükség, hogy összekössük az É-i és D-i szelvényszakaszokat (1. ábra). A szelvény mentén végzett megjelenítésnél rövid pontazonosító neveket használtunk az eredeti helyett.

Magnetotellurikus mérési adatok, eredmények

A nyomvonal nem teljesen egyenes, így kisebb eltérések a szelvénymenti helyszínrajzi elemekben elképzelhetők. Alapvetően a nyomvonal menti távolságot vettük alapul.

A 2. ábra teteje a ρ_{xy} , a 2. ábra közepe pedig a ρ_{yx} látszólagos fajlagosellenállás-görbéket mutatja. Látszik, hogy a különböző idejű MT mérések mintázása eltérő, a legfrissebb mérések mintázása (kezdő és végső frekvenciája) tágabb mélységtartományt fognak át a szelvény közepén.

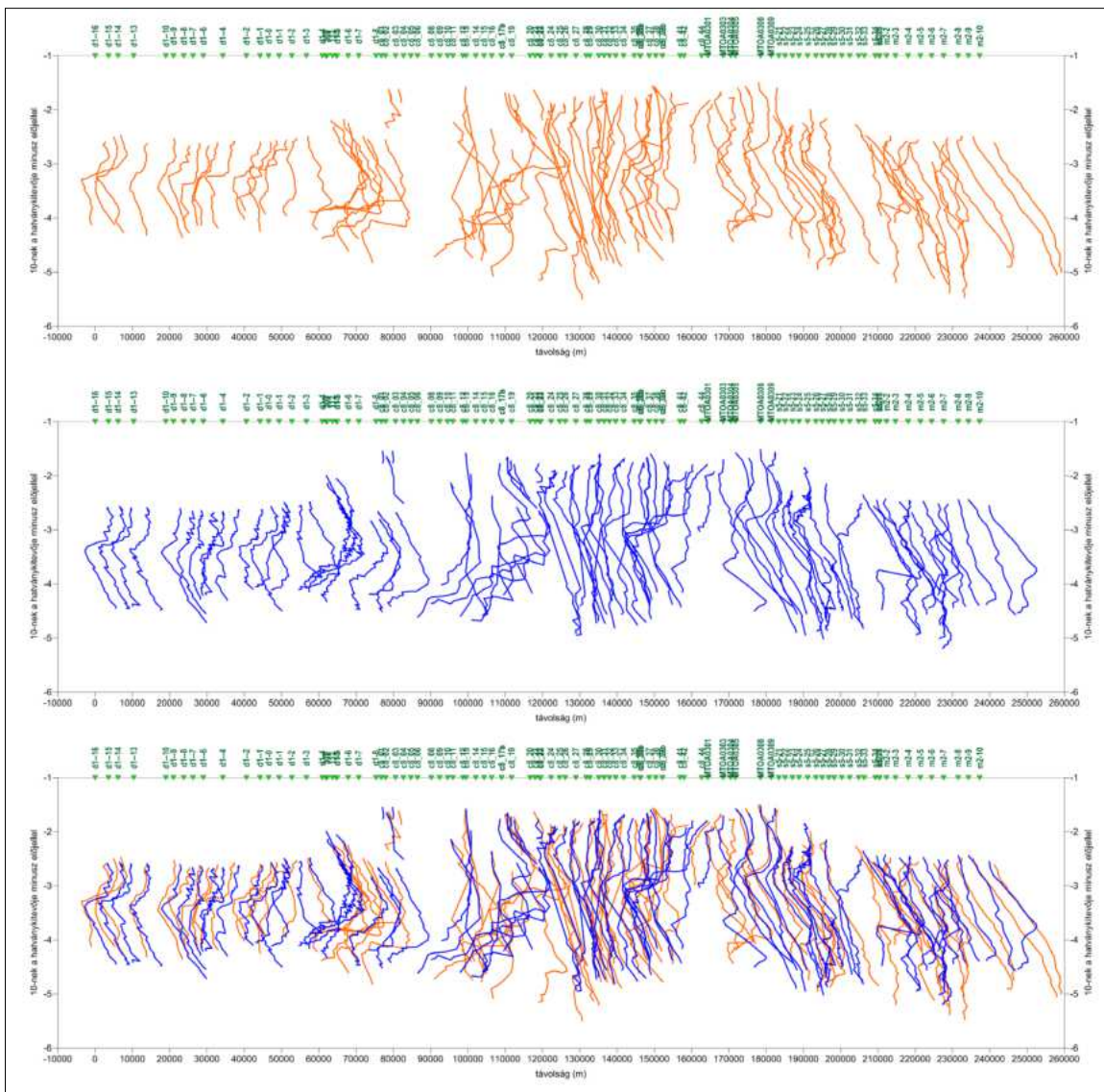
A görbeparmák alapján a Dunántúli-középhegységben és annak ÉNy-i peremén (60–110 vkm) mért görbékben jelentkeznek jelentősebb változások a mélységgel (a szondázási görbék visszagörbülnek). Ez látszik az együttes megje-

lenítésben is (2. ábra, alul) illetve 145–160 vkm-nél hasonló jelenséget figyelhetünk meg.

Az AniMax¹⁾ logaritmikus tengelyű mélységszelvényen (3. ábra) több maximumhely is kirajzolódik. A felszínhez közel jelentkezik maximum Ajkánál, kb. a Kab-hegy alatt (85 vkm körül, <100 m), Tihanynál (110–115 vkm, <100 m) és Kapos folyó mentén (170 vkm körül, <100 m mélységben). További közel függőleges anizotrópiamaximumot találunk mélyebb szinten, ~500 m mélyen 155 vkm-nél és 1000 m-nél nagyobb mélységben, a 65, 87 és 110 vkm-nél. Az első három, a felszíni mágneses kőzetekhez kapcsolódik (pannon bazalt, miocén andezit), addig a mélyebbek eredete bizonytalan. Eredete lehet szerkezeti, de magmás eredetű is (3. ábra).

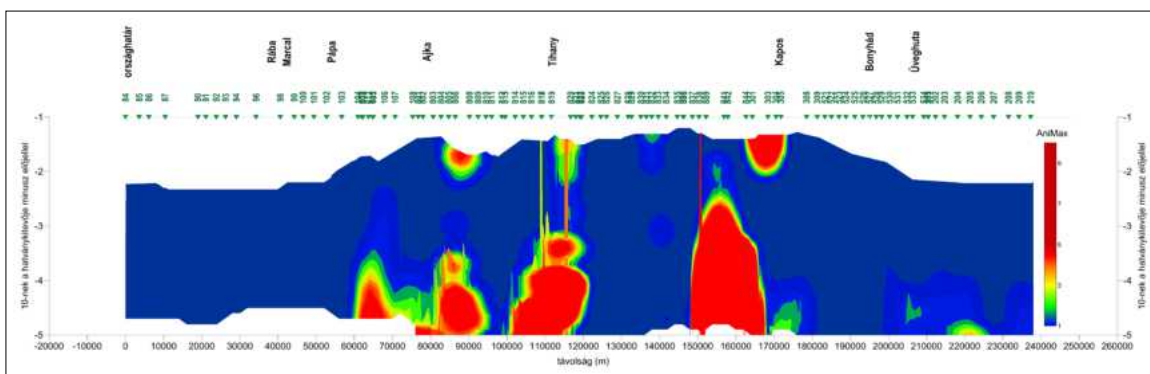
A látszólagos fajlagosellenállás-szelvényeken (4. ábra) határozottan elkülönül a Kisalföld, a Bakony, a Közép-magyarországi Zóna és a Baranyai-szigethegység környezete. Ha a fázisparamétert (5. ábra) is figyelembe vesszük, már sokkal árnyaltabb képet kapunk. A középhegység D-i peremén 50–100 vkm között nagy mélységben is a 45°-nál nagyobb fázisértékek jól vezető összeteteket, jelentős földtani változásokat jeleznek. A laza üledékes medencék a szelvény tetején hasonló, 45°-nál nagyobb fázisokkal jelentkeznek, ezek elsősorban a Kisalföld területén és a Kapos folyó É-i előterében azonosíthatók a fázis értékek alapján.

A 45°-nál nagyobb fázisértékek 40–100 vkm között jelentkeznek 5-től 20 km mélységig (5. ábra). Ezek azok a zónák, amelyeket a Kisalföld magnetotellurikus mérései-



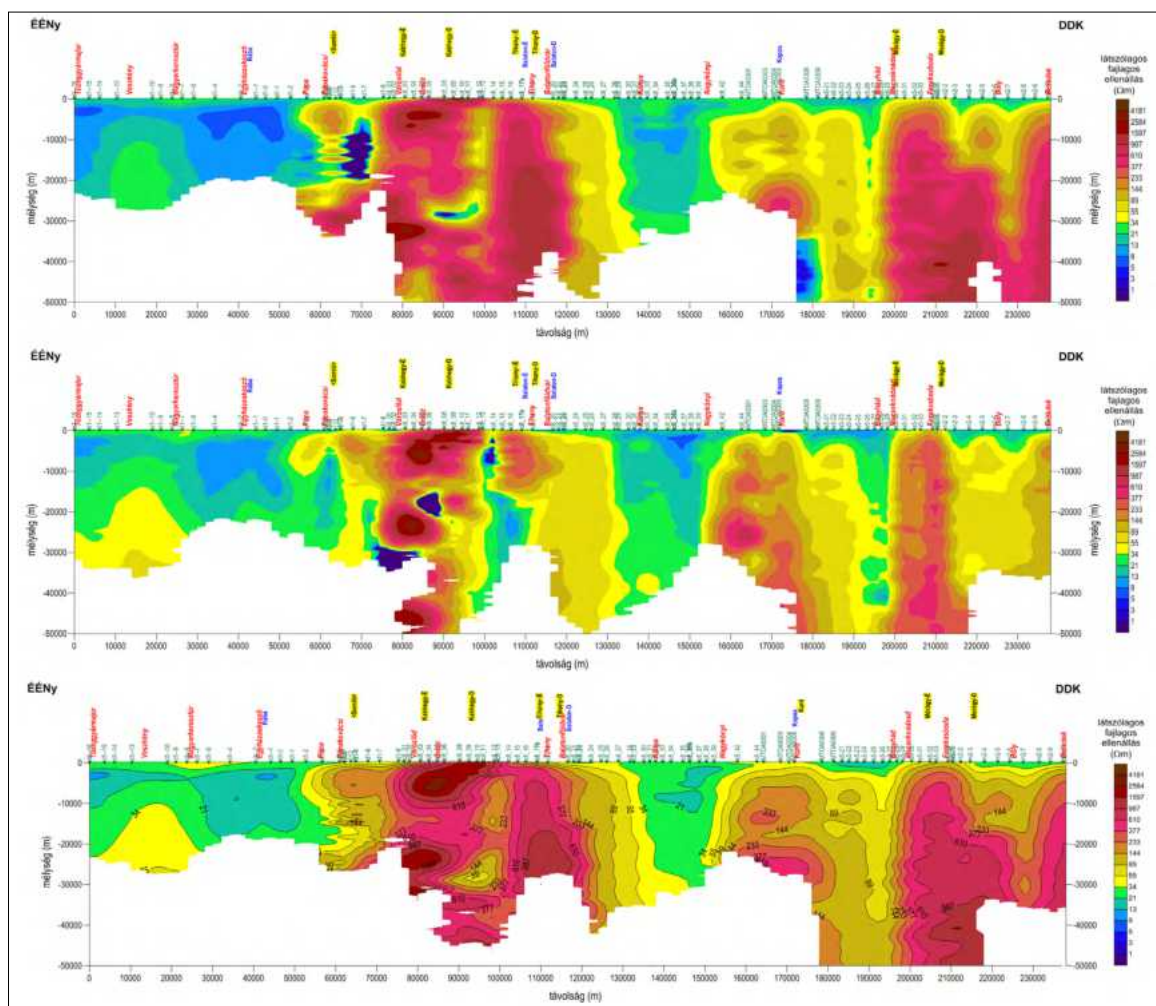
2. ábra MT impedanciából (Z_{xy}) kiszámolt egyszerűsített látszólagos fajlagosellenállás-görbék (ρ_{xy}) – felül, MT impedanciából (Z_{yx}) kiszámított egyszerűsített látszólagos fajlagosellenállás-görbék (ρ_{yx}) – középen. Mindkét polarizációnak a látszólagos fajlagos ellenállás görbéi az MTOA-03 szelvény nyomvonalában – alul (nagyon zajos görbék és pontszerű zajok kiszűrve, az adatok logaritmus mélységskála mentén vannak megjelenítve)

Figure 2 Curves of simplified apparent resistivity (ρ_{xy}) calculated from MT impedance (Z_{xy}) – top. Curves of simplified apparent resistivity (ρ_{yx}) calculated from MT impedance (Z_{yx}) – middle. Apparent resistivity curves for both polarizations along the MTOA-03 profile – bottom (curves with high noise and point-like noise filtered out, all data is displayed on a logarithmic depth scale)



3. ábra Anizotropiamaximumok (AniMax) a szűretlen görbék alapján az MTOA-03 szelvény nyomvonalában (logaritmus mélységskála mentén)

Figure 3 Anisotropy maxima (AniMax) based on unfiltered curves along the MTOA-03 section (on a logarithmic depth scale)



4. ábra MTOA-3 látszólagos fajlagosellenállás-mélységszelvény (ρ_{xy}) – felül, látszólagos fajlagosellenállás-mélységszelvény (ρ_{yx}) – középen, normált látszólagos fajlagosellenállás-mélységszelvény (ρ_{as}) – alul

Figure 4 Depth section of the apparent resistivity (ρ_{xy}) of MTOA-3 – top, depth section of the apparent resistivity (ρ_{yx}) – middle, normalised apparent resistivity (ρ_{as}) – bottom

nek értelmezésekor a Rába-vonaltól DK-re megjelenő dunántúli vezetőképesség-anomáliának írtak le (DVA, Ádám és Verő 1964, Takács 1968, Ádám 1992) és grafitos képződményekkel hozták összefüggésbe. A magnetotellurikus adatok térképi feldolgozása egy háromdimenziós kéreg-anomáliát mutat a Balaton-felvidék alatt (Kiss 2025).

Az anizotrópiamaximumok megjelenítése lineáris mélységskála mentén (6. ábra) látványosan jelzi, hogy a magmás kőzetek megjelenése (pl. bazaltok) anizotrópiamaximumot okoz (Somló, Kab-hegy, Tihany, Kapos folyó É-i előtere). A számítás jellegéből adódóan ott, ahol nincs anizotrópia, ott az AniMax értéke ~ 1 . Ahol ez az érték 2 fölé megy, ott szerkezeti hatás várható, ahol ennél is jóval magasabb, ott 3D hatás vagy magmás képződmény jelenlétével kell számolni. 60–65 vkm-nél a Somló, 80–90 vkm-nél a Kab-hegy és 105–115 vkm-nél, Tihany környékén, valamint a Kapos folyó előterében (adathiányos területen, c8-42-es MT pont környezete), a felső néhány km-es mélységtartományban mindenhol 3-nál magasabb AniMax-érték tapasztalható. A 10-es anizotrópia érték közel függőleges, bazaltos magma csatornákat jelezhetnek, kivéve ta-

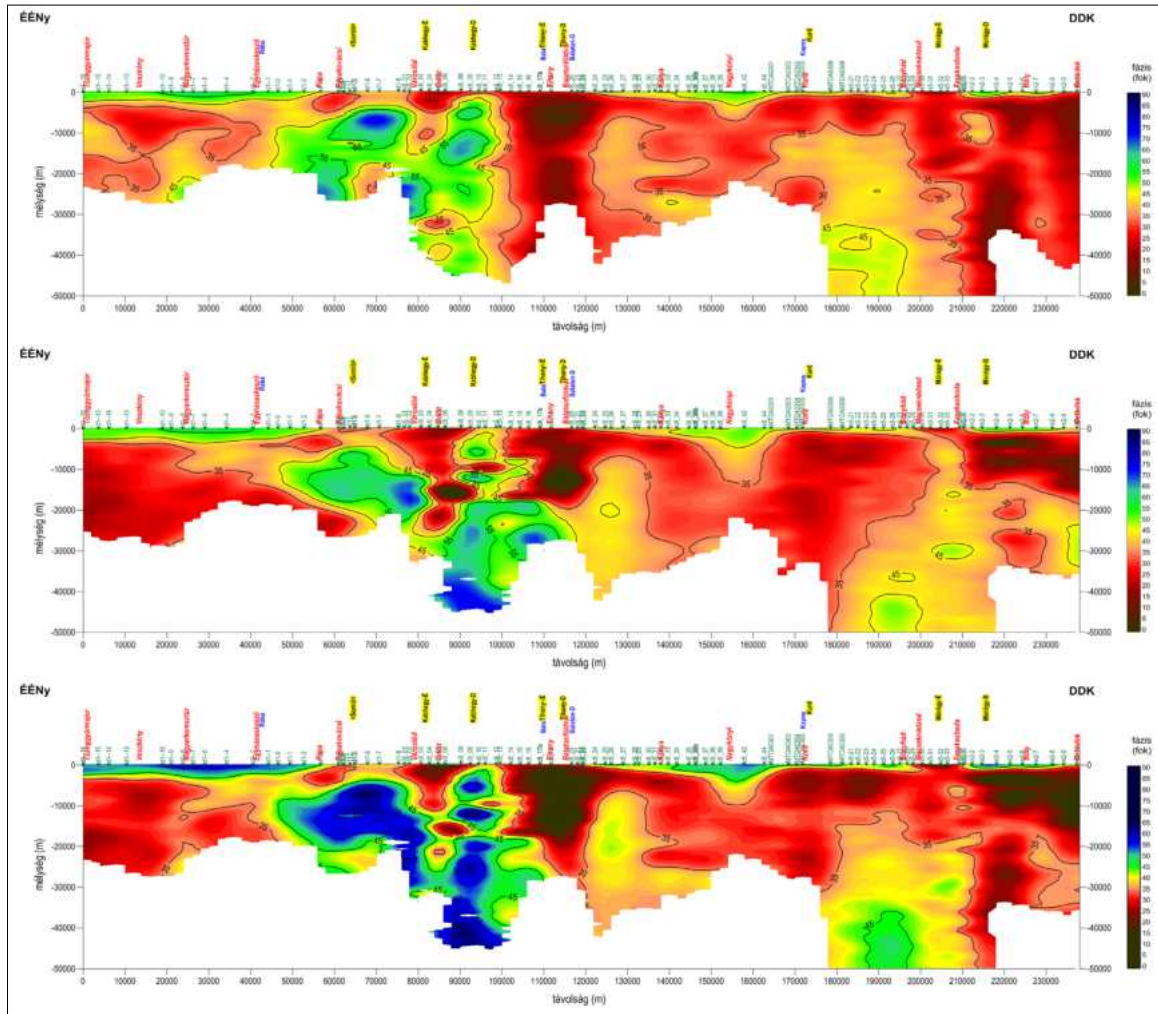
lán 160 vkm-nél, ahol az adathiány miatt egy rossz mérési adat (pl. c8-42), vagy az interpolálás elviheti az anizotrópia értékét.

További geofizikai mérési adatok, eredmények

Érdeemes itt is összevetni a gravitációs, mágneses (7., 8. ábra) és a magnetotellurikus mérések eredményeit. A 9. ábra mutatja a spektrálanalízis segítségével készített sűrűségi mélységmetszetet. A korábban említett blokkosodás itt is megfigyelhető. Nagy sűrűségű blokkként azonosítani lehet a Kisalföldön a Mihályi-nyerget 17–18 vkm-nél, majd a középhegységi vonulatot 60–130 vkm között és végül Dél-Dunántúlon a Mecsek-hegység és a Mórággy-rög blokkját 205–230 vkm között.

A Rába-vonal és a Középmagyarországi-vonal jól azonosítható minimumzónaként jelentkeznek, a többi relatív minimumzóna is szerkezeti kapcsolattal bír.

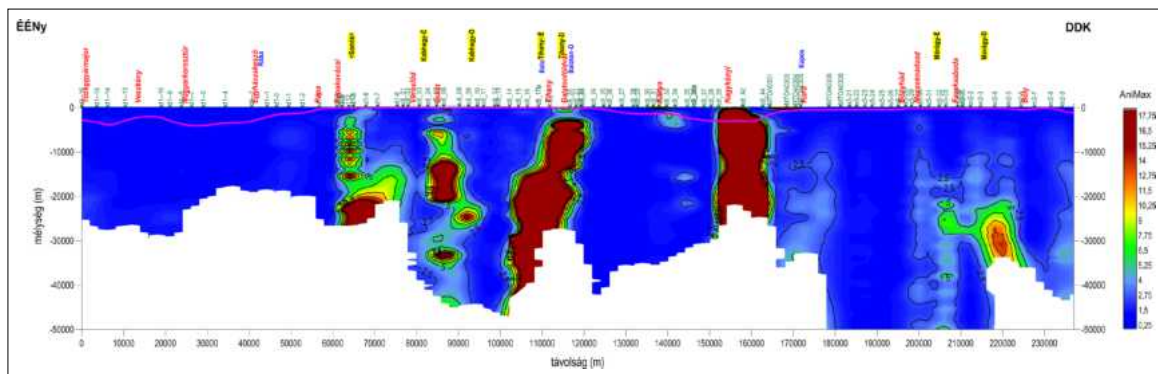
A mágnesezettségi mélységmetszetet (10. ábra) azonosíthatjuk a Páztori-vulkánt (10–50 vkm körül), a keme-



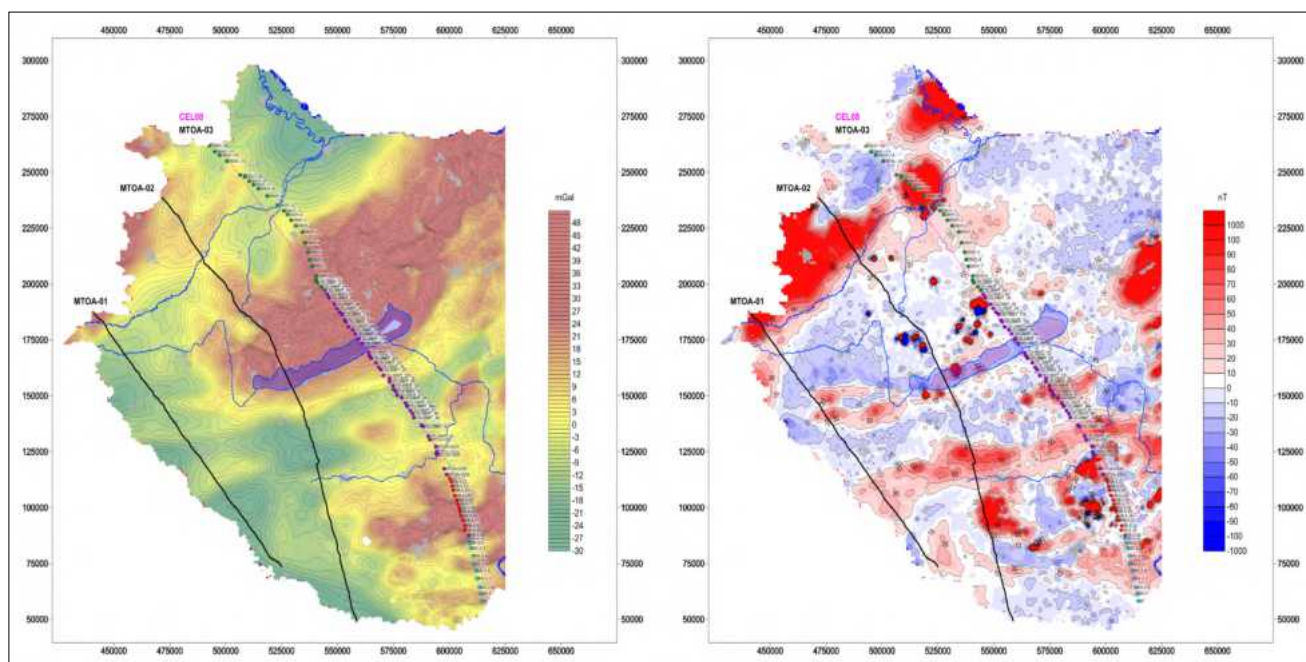
5. ábra MTOA-03 impedanciafázisok (φ_{xy}) (felül), (φ_{yx}) (középen) és az átlagfázis (φ_{ave}) mélységszelvénye (alul)
Figure 5 Depth section of the MTOA-03 impedance phases (φ_{xy}) (top), (φ_{yx}) (middle), and the average phase (φ_{ave}) (bottom)

nesháti bazaltokat (38–40 km), a tihanyi bazalt tanúhegyet (114 vkm körül). Mélyebben több kisebb hatás azonosítható, például Kab-hegy (80–90 vkm, de a nyomvonal elkerülte a hegyet), vagy a Közép-magyarországi Zóna alatt (140–150 km), illetve a Kapos-vonaltól D-re, illetve kisebb hullámzás a Mecsek-aljánál (205 vkm).

A ritka mérési háló miatt a kisebb testek nem jelennek meg, továbbá a testek felső helyzetét a felbontástól függően pontosan mutatja, de a mágneses test alsó részének azonosítása bizonytalan (kicsi a mágnesezettségi kontraszt a felszínhez közelebb lévő testekhez képest). A szelvény mentén már a CEL08 szelvény esetében elvégeztük a mág-

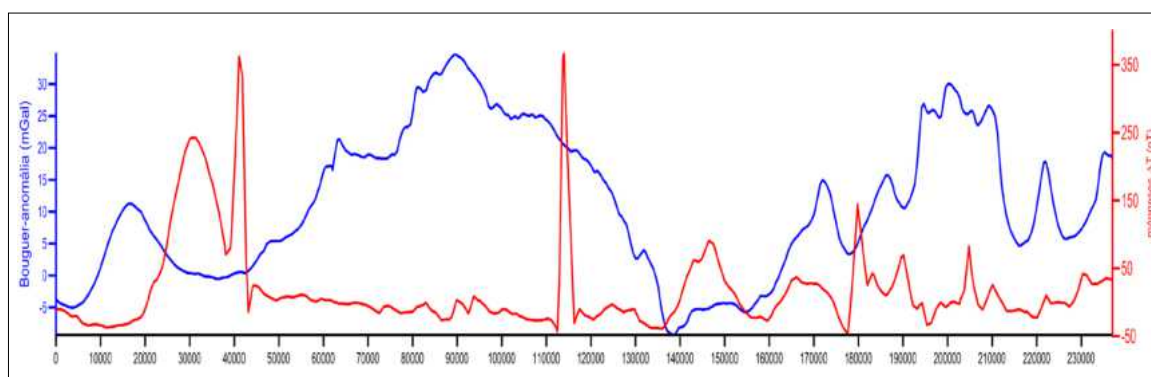


6. ábra MTOA-03 látszólagos fajlagos ellenállás anizotrópiamaximum-mélységmetszete
Figure 6 Depth section of the maximum apparent resistivity anisotropy for MTOA-03



7. ábra A Dunántúl izosztatikusan korrigált Bouguer-anomália-térképe és a mágneses ΔZ anomália-térkép a magnetotellurikus alapszelvények nyomvonalával és az MTOA-03 szondázási pontjaival

Figure 7 Map of the isostatically corrected Bouguer anomaly and the magnetic ΔZ anomaly in Transdanubia, showing the routes of the magnetotelluric base profiles and the MTOA-03 sounding points



8. ábra Bouguer-anomália és mágneses ΔT anomália a szelvény nyomvonalában (Kiss 2009)

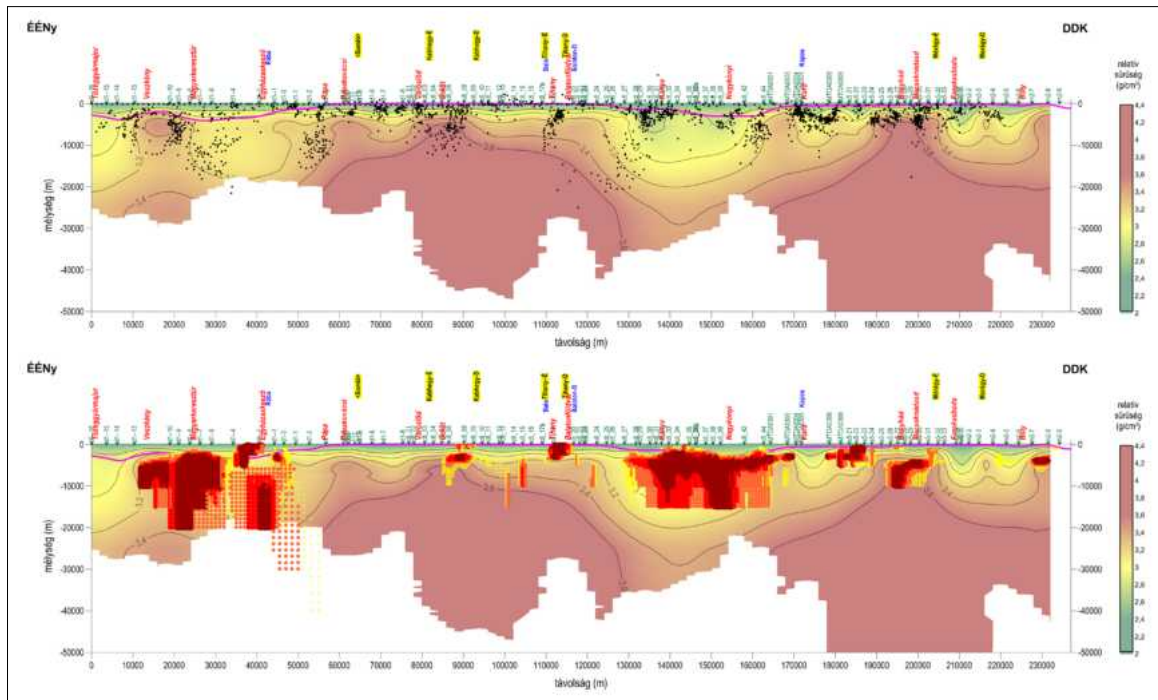
Figure 8 Bouguer anomaly and magnetic ΔT anomaly along the profile (Kiss 2009)

neses Naudy-féle hatókijelöléseket (Kiss, Prácser 2016). Most ezeket is rátettük a szelvényre, elcsúsztatva és korrigálva a távolságokat, amelyek a némileg eltérő nyomvonalból adódtak.

A kisalföldi Pásztori-vulkánnak nevezett mágneses hatót a mágnesezettségi mélységmeteszet egészen mély gyökerűnek mutatja (10. ábra), bár a Naudy-megoldások a tetejét 2-3 km-re teszik. A felszíni pannon bazalt (Egyházaskesző–Malomsok vonal) jól azonosítható a mélységmeteszet és a mágneses Naudy-féle hatókijelölés alapján is. Somló nem látszik a szelvényen egyrészt mert különálló tanúhegy, másrészt, mert noha bevetítettük az MT adatok értelmezéséhez, de a szelvény nyomvonalán kívül található (kb. 25 vkm-re). A Somlóhoz nagy sűrűségű mélységi blokk kapcsolható a 9. ábra (alul) alapján, mint ahogyan

a Kab-hegyhez. és tulajdonképpen Tihanyhoz is, ami elvileg ellentmond az izosztáziának. Feltételezhetően egy másik hatással is számolni kell, a kéreg-köpeny határra benyomuló nagy sűrűségű bazaltos magma hatásával (magma underplating).

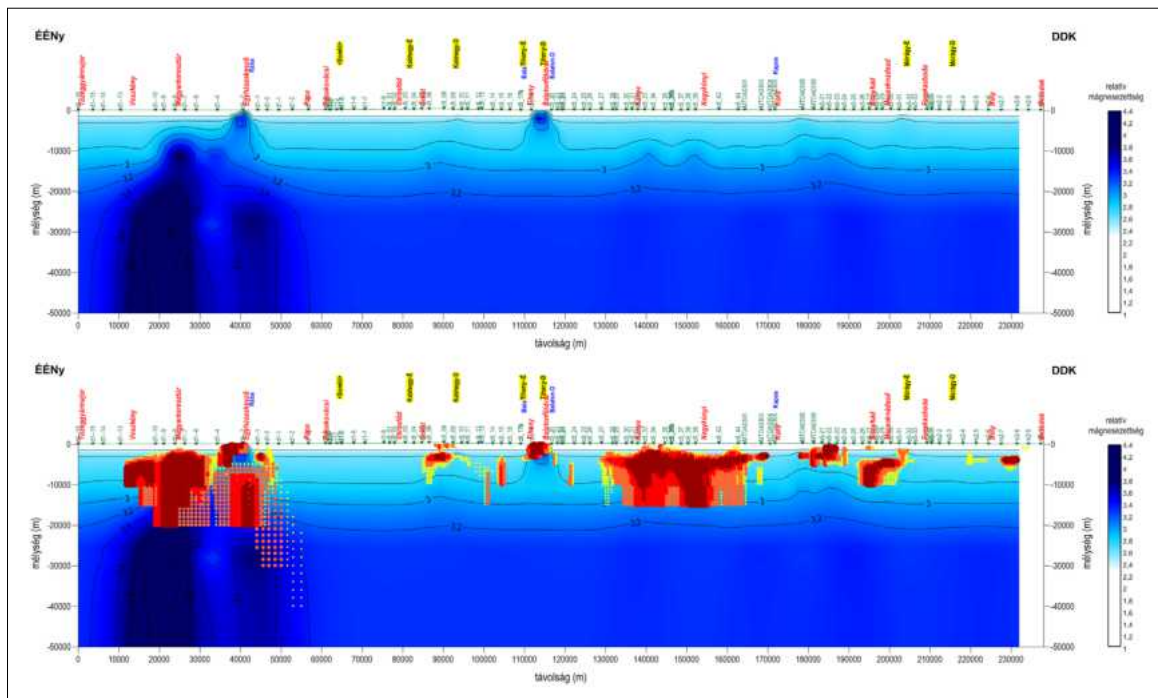
Ez a mélybeli nagy sűrűségű blokk azonban nem mutat mágneses tulajdonságot a mágnesezettségi mélységmeteszet alapján (10. ábra), miközben a Pásztori-vulkán alatt mély, mágneses gyökérszóna azonosítható! Valószínűleg a Curie-mélységnél kisebb mélységben nincs összefüggő, nagy tömegű mágneses anyag, csak közel függőleges, lokális bazalttelérek a kristályos kőzet repedéseiben, de a fő tömeg a Curie-mélység alatt jelentkezik, ahol már nem mágneses.



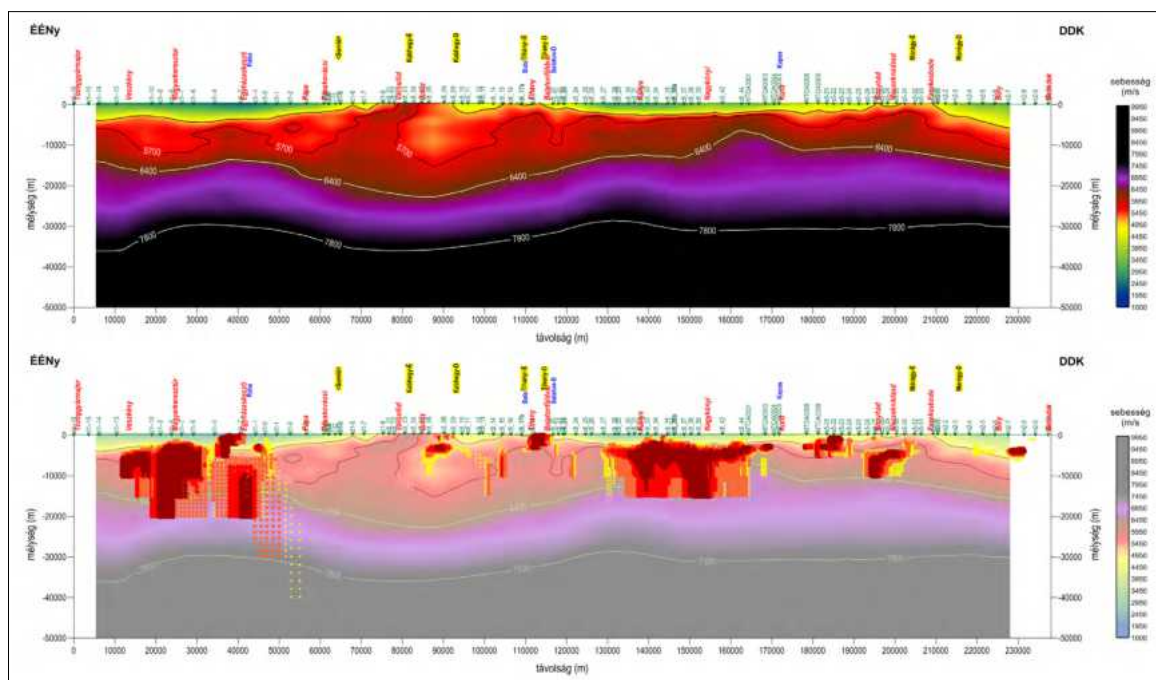
9. ábra | MTOA-03 relatív sűrűségi mélységmetszete gravitációs hatókijelöléssel (felül) és a Naudy-féle mágneses hatókkal (alul)
Figure 9 | Depth section of relative density for MTOA-03 (top), with gravity automatic source detections (middle) Naudy's magnetic bodies (bottom)

Kab-hegy magasságában is megjelennek Naudy-féle testek, és a relatív sűrűség-eloszlás is maximumot mutat (11. ábra), noha a nyomvonal a Kab-hegyet sem érintette. Tihany egyértelműen jön mindkét megjelenítésben, a mérési szelvény Tihanyi-félszigeten ment keresztül (1. ábra).

Mivel az MTOA-03 szelvény a CEL08 litoszférakutató szeizmikus szelvényel közel azonos nyomvonalon halad, így a szeizmikus v_p sebesség mélységmetszete (Fancsik et al. 2001) is rendelkezésre áll (11. ábra), amivel a korábbi években már többször foglalkoztunk (Kiss 2009, Kiss és



10. ábra | MTOA-03 relatív mágnesezettségi mélységmetszete (felül) és a Naudy-féle mágneses hatókkal (alul)
Figure 10 | Depth section of relative magnetization for MTOA-03 (top) with the Naudy's magnetic bodies (bottom)



11. ábra MTOA-03 szeizmikus sebesség mélységmetszete (felül) és a Naudy-féle mágneses hatókkal (alul)

Figure 11 Depth section of seismic velocities for MTOA-03 (top) with the Naudy's magnetic bodies (bottom)

Prácser 2016). A kezdő és végpont nem pontosan ugyanaz, és a DKH-1 magnetotellurikus szelvény a kisalföldi szakaszon ívelt nyomvonala is eltér a CEL08 litoszféraszelvény nyomvonalától, valamint a D-i végén a Kapos folyótól más nyomvonalon halad (1. ábra), így nem pontosan illeszthető a sebességszelvény az MTOA-03 szelvényvel.

A sebességszelvényen tájékoztatási céllal feltüntetettük a Conrad-felületnek megfelelő, 6400 m/s értékű izovonalat, amely érdekes módon pont ott van legközelebb a felszínhez, ahol a mágneses Naudy-megoldások bázisos/neutralis magmás képződményeket jeleznek. Felmerül a gyanú, hogy az alsó kéreg (SiMa) bázisos képződményei emelkedtek itt Curie-hőmérséklet feletti tartományba. Ez a jelenség az izosztáziával is kapcsolatban lehet, mivel a Kisalföld és a Közép-magyarországi Zóna vastagabb üledékes medencéi alatt azonosítható a jelenség (Kiss 2010).

A bazaltos anyag a felszínközélen is lokálisan megjelenik, például Egyházaskeszőnél (40 vkm), a Kab-hegy (80–90 vkm) alatt, vagy Tihanyánál (115 vkm). Ezekhez megemelkedett sebességek kapcsolódnak (11. ábra). Az egyházaskeszői és tihanyi bazaltokat a mágneses anomáliák is jelzik (10. ábra), de Kab-hegyet a szelvény nyomvonal elkerülte, így a távolsággal arányosan lecsengő mágneses anomáliatérben a bazalt hatása oldal irányból már nem érződik, csak egy mélyebb szinten.

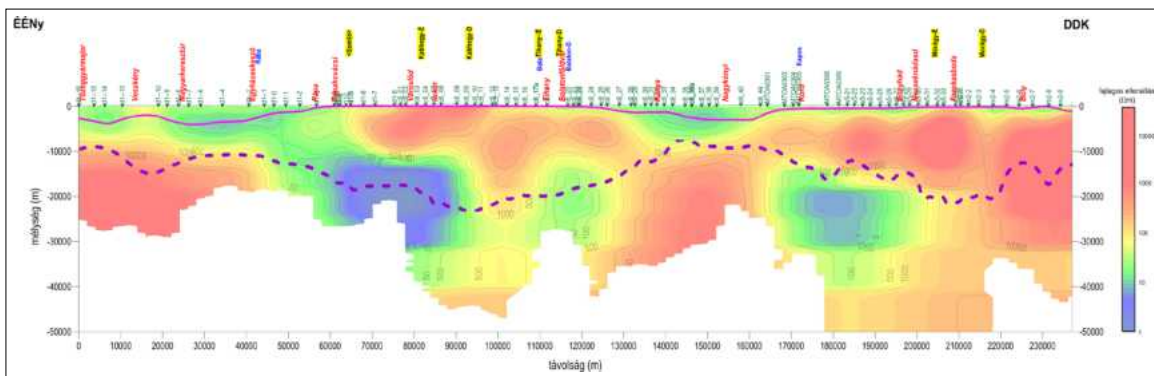
MT inverziók és értelmezések

Elkészítettük ennek az alapszelvénynek 2D inverzióját (TE, TM és közös inverzió). Az inverziók általános beállításainak a következőket használtuk:

- topográfia figyelembe vétele (az állomások magasság értékei alapján)
- „smooth model inversion”
- minimum-maximum ellenállás (1–50 000 Ωm)
- bemenő adat: a simított görbék
- frekvencia tartomány: 10^4 – 10^{-5} Hz
- figyelembe vettük a bemenő adatok szórását, ha rendelkezésre álltak
- max. 60 iteráció

Elvégeztük a 2D inverzióhoz szükséges szerkezetelemzést a domborzati, a Bouguer-anomália- és a mágneses-anomália-térkép alapján, amiből nagyjából 65° -os szerkezeti csapásirány adódott. Ezért az állomások adatainak egységes, 65° -os forgatása mellett döntöttünk az inverzió elvégzése előtt.

A 12. ábra az MT TM módú adatok 2D inverziójának eredményét mutatja. Ez kevésbé érzékeny a szerkezetekre, ezért a földtani blokkok kijelölése és a prekainozoos medencealjzat felszínének nyomon követése szempontjából kedvezőbb, mint a TE módú mérési adat. A szelvényre feltettük a Haas-féle medencealjzat-görbét. Az eredmények vizsgálata azt mutatta, hogy a fajlagosellenállás-mélységszelvény és a Bouguer-anomália-görbe között negatív korreláció van (a mélységszelvényre rátettük a tükrözött Bouguer-anomália-görbét, 12. ábra, szaggatott lila görbe). Ez gyakorlatilag megfelel az izosztázia elvéből adódó törvényszerűségnek, azaz ahol a felszínen nagy fajlagos ellenállású (~nagy sűrűségű) képződmény van (pl. medencealjzat-kibúvás Balaton-felvidéken), ott a görbe mélyebben húzódik, ahol laza üledékes medenceképződmények vannak, ott ez a görbe feljebb található. Ahol legjobban meg-



12. ábra Invertált fajlagosellenállás-szelvény (TM), a Haas-féle medencealjzatszinttel (püspöklila vonal) és a szelvényre önkényesen rávetített negatív Bouguer-anomáliával (szaggatott lila vonal)

Figure 12 Inverted resistivity section (TM), showing the Haas's basement level (purple line) and the negative Bouguer anomaly arbitrarily superimposed on the section (dashed purple line)

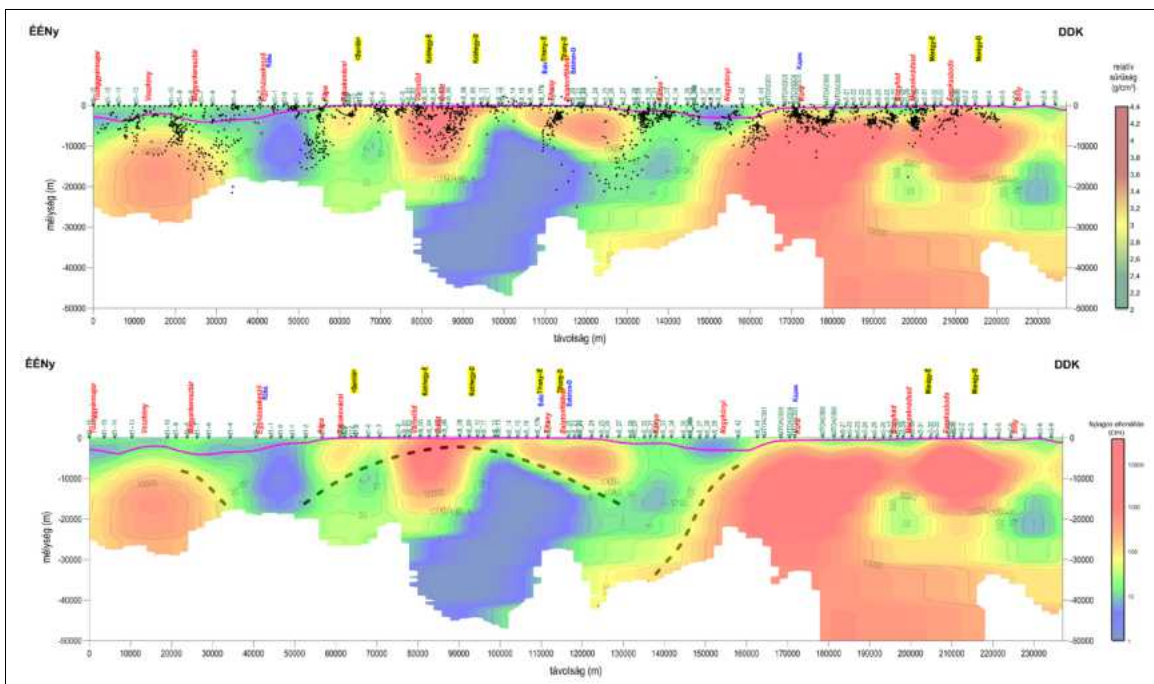
közelíti a felszínt, ott alsó kéreg típusú képződményeket, mágneses hatókat (Közép-magyarországi Zóna, Kisalföld) jeleznek a mágneses feldolgozások.

Az MT TE módú adatok 2D inverziójának az eredményét a 13. ábra mutatja. Mivel ez a szerkezetek kijelölésében a legérzékenyebb, a fajlagosellenállás-mélység-metszetet a gravitációs hatókijelöléssel vetettük össze (13. ábra, felül).

A mélységmetszeten jól azonosíthatóak a Rába-vonal és a Közép-magyarországi-vonal mentén megjelenő jól vezető zónák. A Dunántúli középhegységi egység mezozoos blokkja az Ausztróalpi és Dél-dunántúli Mecseki egység között jelenik meg. Ebben a középső zónában

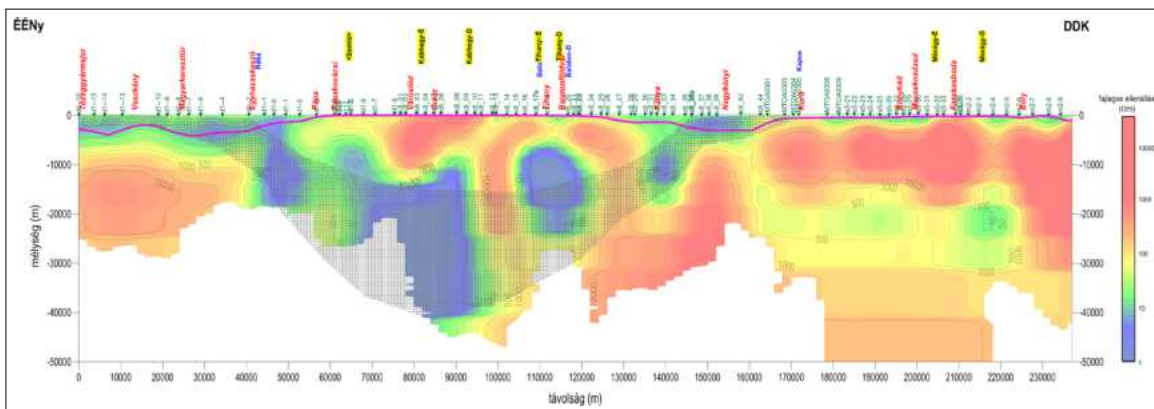
megtalálható a Dunántúli Vezetőképesség Anomália (DVA) is, amely a Kab-hegy és Tihany között 5 km mélységtől lefelé jelentkezik nagyon kicsi fajlagosellenállás-értékekkel.

A magnetotellurikus adatok térképezési feldolgozásában (Kiss 2025) a DVA-hoz kapcsolható MT fázisanomáliák egy 3D testet jeleztek, kb. 5 km mélységtől, aminek magyarázata magmás benyomulás, ehhez kapcsolódó kőzetolvadék vagy jól vezető, illetve mágneses anyag megjelenése az adott mélységben. A 13. ábra alsó részén az 50–130 vk között behúzott szaggatott értelmezési vonal (amely a sűrűségmélység-metszet alapján is azonosítható), a középhegységi domborzatot kialakító benyomulásra



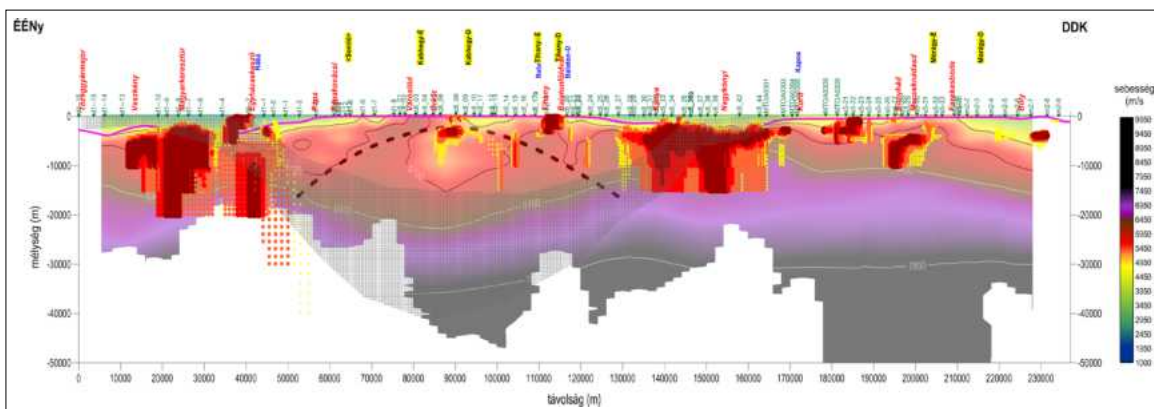
13. ábra Invertált fajlagosellenállás-szelvény (TE), a Haas-féle medencealjzatszinttel (püspöklila vonal) és a gravitációs hatókijelöléssel (felül), valamint egy lehetséges kéregszintű értelmezési vonalakkal (szaggatott fekete vonalak, alul)

Figure 13 Inverted resistivity section (TE), showing the Haas's basement level (purple line) and the gravity source detections (top), as well as a possible crustal-level interpretation line (dashed black lines, bottom)



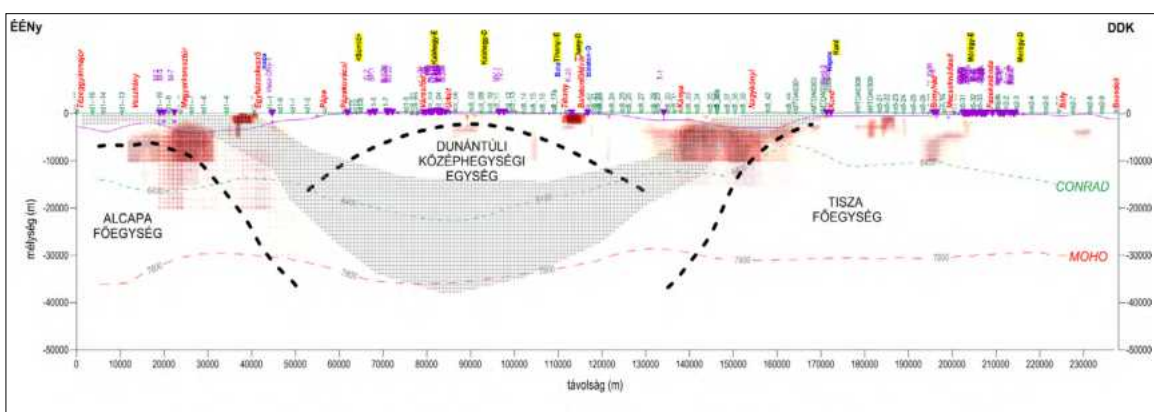
14. ábra Invertált fajlagosellenállás-szelvény (TE és TM együttes inverzió), a Haas-féle medencealjzatszinttel (püspöklila vonal) és a jól vezető zónák grafikus (sraffozásos) összekötésével

Figure 14 Inverted resistivity section (TE and TM common inversion), showing the Haas's basement level (purple line) and the graphical (hatched) connection of the highly conductive zones



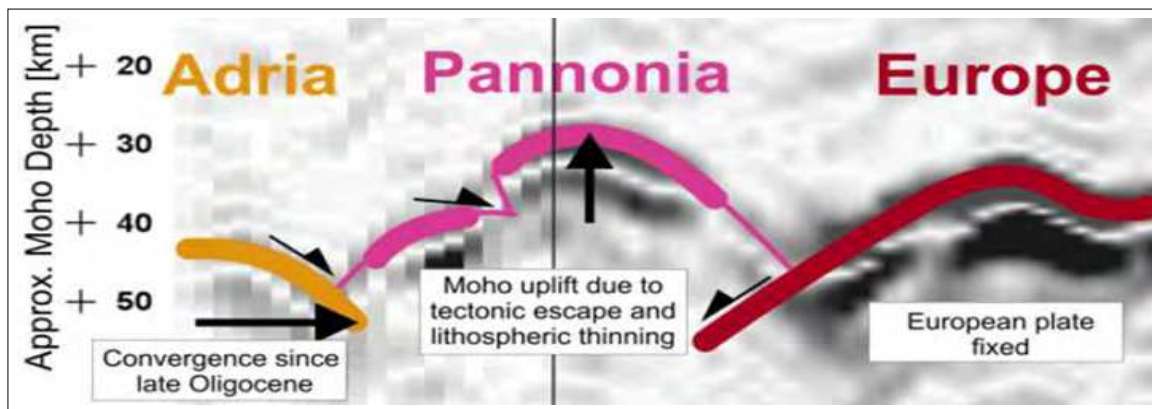
15. ábra Szeizmikus sebességszelvény, Naudy-féle hatókijelölés eredményeivel és néhány MT értelmezéssel (a Haas-féle medencealjzat szinttel – püspöklila vonal)

Figure 15 Seismic velocity section, with the Naudy's magnetic causative bodies and some MT interpretations (by basement level of Haas – purple line)



16. ábra Egy blokkos litoszféraszintű értelmezési vázlat. (Prekainozoos medencealjzat – lila vonal, szeizmikus Conrad – zöld szaggatott vonal, szeizmikus Moho – piros szaggatott vonal, mágneses Naudy-féle hatókijelölés – sárga-piros-barna pontok, mélyfúrások medencealjzat szinttel – lila szimbólum és felirat, főbb inverziós MT határfelületek – fekete szaggatott vonal, MT jól vezető zóna – sraffozással, MT mérési pontok – zöld felirat, települések – piros felirat)

Figure 16 This is a lithosphere level interpretive schema. (PreCenozoic basement – purple line, seismic Conrad – green dashed line, seismic Moho – red dashed line, magnetic Naudy contour – yellow-red-brown dots, deep boreholes at basement level – purple symbol and label, major MT inversion interfaces – black dashed line, MT high-conductivity zone – hatched, MT measurement points – green label, settlements – red label)



17. ábra Egy regionális litoszféraszelvény értelmezése az Alpok–Kárpátok átmeneti zónában. [A MOHO-határfelület helyzete konvergens lemezmozgások esetén (DNy–ÉK és DDNy–ÉÉK irányú szelvény) (Brückl et al. 2006)]

Figure 17 Interpretation of a regional lithospheric section in the Alpine–Carpathian transition zone. [We can see the position of the MOHO boundary in the case of convergent plate movements (Cross-section in the SW–NE and SSW–NNE directions) (Brückl et al. 2006)]

utalhat. Ennek középpontja a Kab-hegy (legnagyobb vulkáni ösztérfogattal), peremi részei pedig D-en Tihany, É-on a Somló, lokális jellegű bazaltvulkanizmussal.

A kétdimenziós közös inverzió egy másfajta kapcsolatot is jelezhet, mert a Rába-vonal és a Közép-magyarországi-vonal dőlésében és elektromos fizikai paraméterében a Dunántúli-középhegységi egység gyökérvonaljával (14. ábra, sraffozva) is kapcsolatban lehet – az izosztatikusan megvastagodó kéreg, izosztatikusan gyökérvonal formáját mutatja, amit a sebességszelvényen is látunk (15. ábra).

A peremi medencék mentén, ahol a gyökérvonal megszűnik, izosztatikusan alapon köpenykiemelkedések vannak, amelyek a mágneses adatokon elvégzett Naudy-féle hatókijelölések alapján nagyobb mennyiségű bázisosabb (mágnás) anyagot hoznak felszínközelbe (alsó kéregből származó anyag kerül a Curie-hőmérsékletnél kisebb hőmérsékletű mélységbe). Ezek a nyomásviszonyok megváltozása miatt az üledékes medencéket elérve, azok alján terülnek szét vízszintesen, de néhány esetben akár a felszínig is feljöhhetnek.

A középhegységi zónában, a kristályos kőzetekben ezzel ellenkezően, a szerkezetek mentén, vertikális telérek, repedések mentén, a felszínen azonosítható tanúhegyek formájában, elsősorban jelentkezik a bazaltos kőzetanyag, azaz nincs jelen tömegesen.

A 16. ábra egy lehetséges litoszféraszintű értelmezést mutat. Felmerül a kérdés, hogy az ALCAPA (Ausztro-Alpi Főegység) és a TISZA (Mecseki Főegység) kompressziója, avagy egy bazaltbenyomulás miatt alakult ki a MT mérések értelmezéséből kirajzolódó szerkezet (fekete szaggatott vonal). Ez a vázlat nagyon hasonlít egy a K-Alpok területén mért szeizmikus litoszféraszelvény értelmezésére (17. ábra). A különbség csak annyi, hogy a K-alpi szeizmikus értelmezésen a Moho szintjében mutatnak ki egy hasonló konvergens lemezmozgások hatására kialakult rajzolatot. A geodinamikai mozgásoknak köszönhető változások miatt az eltérő szelvényirányok ellenére hasonló rajzolatot mutatnak, csak az európai lemez egyik esetben észak-európai, másik esetben pedig dél-európai.

A földtani egységek találkozásánál, a fő szerkezeti vonalak (Rába-vonal – 40 vkm és Közép-magyarországi-vonal – 135 vkm) mentén a mágneses adatok alapján felszíni, illetve mélybeli mágnás tevékenység azonosítható. A Dunántúli Középhegységi Egység kristályos kőzeteiben is megjelenik a bazaltvulkanizmus, de ott lokálisan lehet csak jelen, feltételezhetően egyedi magmacsatornákon keresztül kerül felszínközelbe, aminek emlékét őrzik a köpeny-zárványokat is tartalmazó (Embey-Isztin 2017) Balatonfelvidéki bazaltos tanúhegyek. Ezekre az anizotrópiajelenségek alapján következtethetünk (6. ábra), bár az MT mérések ponttávolsága nem tud megfelelő felbontást biztosítani ehhez. A CEL08 litoszféraszelvény (15. ábra) alapján a középhegység alatt megjelenik az izosztatikusan gyökérvonal, mellette a peremi medencék / nagyszerkezeti zónák mentén a Moho- és a vele szinkronban mozgó Conrad-határfelület is megemelkedik (16. ábra).

Összefoglalás

Jelen tanulmányban ismét egy magnetotellurikus alapszelvény (MTOA-03) komplex mérési adatait és ez ebből kapott eredményeket mutattuk be. A szelvény az északi határszéltől (a Hanságtól) a déli határszélig (Villány–Mohács) húzódik a Dunántúl területén. A szelvény nyomvonalára kapcsolódik a CEL-08 litoszféraszelvény nyomvonalához, bár a magnetotellurikus mérések nyomvonalára helyenként (elején és végén) attól eltérő (1. ábra).

A feldolgozási eredményekben megjelennek az üledékes medenceterületek, a prekainozoos medencealjzat kibúvások, a felszíni vulkanitok és a mélybeli mágnás kőzetek hatása, nem beszélve a szerkezeti zónák és a mélység miatt ma még ismeretlen eredetű, fázis alapján detektálható kéreganomáliákról (Kiss 2025). A szelvény mentén a sűrűnek tűnő mérési pontok között 2–8 km távolság van, és a legelső szondázási frekvencia 1500–2500 m mélységben jelenik meg, így a felszíni földtani adatokra a mérés

értelmezésekor csak regionális felépítés szempontjából számíthatunk.

A magnetotellurikus nyers mérési adatok (látszólagos fajlagos ellenállás és fázis) megjelenítése során vizsgáltuk a szondázási görbéket, az azokból kapott mélységmetszeteket, összevetettük a gravitációs és mágneses adatokkal és feldolgozási eredményekkel, valamint elkészítettük a magnetotellurikus mérési adatok kétdimenziós inverzióját is.

A különböző irányú magnetotellurikus mérési adatok eltérő földtani sajátosságokat tükröznek vissza az érzékelő szondák helyzetének függvényében. A kettő közötti eltérés (anizotrópia) összetételbeli és szerkezeti változásokra hívják fel a figyelmet (6. ábra). A kapott invertált fajlagos ellenállás-mélységjelvények megjelenítése néhány sajátos, kéregszerkezeti és vulkanológiai összhatást mutat, amit a gravitációs, mágneses és szeizmikus mérések alapján ellenőrizhetünk.

A kiegészítő gravitációs, mágneses és szeizmikus adatok nélkül nehéz lenne értelmezni a magnetotellurikus mérés eredményeit, mivel kevés mélybeli földtani információval rendelkezünk. Csak néhány sekély fúrás van a szelvény nyomvonalában, és ezek közül csak a kislépföldi fúrások értek el a néhány kilométeres mélységet. A legmélyebb fúrás: Bogyoszló, M-2 fúrás, talp: 2507 m. A fúrások többsége, a Dunántúli-középhegységben és a Mórággy-rögön található, és sekélyebbek (16. ábra). A fúrások az adott lépések és megjelenítés mellett szinte alig látszanak (16. ábra).

A tanulmány szerzői

Kiss János, Szebenyi Renáta Mónika

Jegyzet

¹⁾ AniMax – Anizotrópiamaximum, $R_{\text{AniMax}} = (|\rho_{xy}/\rho_{yx}| + |\rho_{yx}/\rho_{xy}|)/2$.

Hivatkozások

Ádám A., Verő J. (1964): Ergebnisse der regionalen tellurischen Messungen in Ungarn. Acta Technica 47, 761–773.

Ádám A. (1992): A dunántúli elektromos vezetőképesség-anomália földtani és módszertani jelentősége, Akadémiai székfoglaló: 1990. szeptember 24. Értekezések, emlékezések. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN 963-05-6403-3

Brückl E., Behm M., Bleibinhaus F., Grad M., Guterch A., Keller G. R., Thybo H., CELEBRATION 2000 & ALP2002 Working Groups (2006): Tectonic interpretation of a 3D seismic model of the Eastern Alps, EGU poster

Embey-Isztin A. (2017): Köpenyeredetű kőzetek felismerésének története és szerepe a geológiai gondolkodás fejlődésében. Földtani Közöny, 147/4, 415–422. <https://doi.org/10.23928/foldt.kozl.2017.147.4.415>

Fancsik T., Redlerné Tátrai M., Hegedűs E., Kummer I., Mészáros F., Kovács A. Cs., Csabafi R., Jánváriné Kántor I., Zilahi-Sebess L., Varga G., Török I. (2001): Magyarország földtani térmodellje. Jelentés a 2001. évi feladatok elvégzéséről, p. 25. Kézirat, ELGI, MBFGA adattár (Ad.1872)

Gúthy T., Hegedűs E., Redlerné Tátrai M. (2000): Litoszféra kutatás 1998–2000. Kézirat, ELGI (AD.1811), MBFGA adattár

Kiss J. (2009): A CEL08 szelvény geofizikai vizsgálata. Magyar Geofizika, 50/2, 59–74.

Kiss J. (2010): Mély medencék izosztikus hatása, Magyar Geofizika, 51/3, 1–13.

Kiss J. (2025): Háromdimenziós kéreganomália a magnetotellurika alapján a Balaton-felvidéken. Magyar Geofizika, 66/4, 118–135.

Kiss J., Prácsér E. (2016): Szelvény mentén végzett adatfeldolgozási eljárások – hatókijelölés, frekvenciaszűrés és mélységfókuszálás – alkalmazása a CEL08 vonalon. Magyar Geofizika, 57/2, 69–87.

Kiss J., Varga G. (2003): Gravitációs, földmágneses és magnetotellurikus modellezés. Jelentés a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok tervezett üveghutai tárolójával kapcsolatos ELGI által 2002-ben végzett geofizikai munkálatokról. Kézirat, MBFGA adattár

Kiss J., Szebenyi R. M. (2023): Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01 alapszelvény (CEL07 litoszférakutató szeizmikus tomográfia-szelvény mentén). Magyar Geofizika, 64/2, 78–94.

Kiss J., Szebenyi R. M., Lukács T. (2024): Magnetotellurikus Országos Alapszelvények – A dunántúli MTOA-02 szelvény komplex feldolgozása. Magyar Geofizika, 65/4, 138–152.

Szebenyi R., Kiss J., Héja G. H. (2024): Using archived magnetotelluric data for geologic interpretation in the Transdanubian Region. Acta Geodaetica et Geophysica, 59, 311–329. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00440-3>

Takács E. (1968): Anomalous conductivity of the upper crust in the NW foreground of the Bakony Mountains. Acta Geod. Geoph. Mont. Hung., 3, 155–160

CBGA 2026

The 23rd Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association (CBGA 2026) will take place in *Cluj-Napoca, Romania, on 9–11 September 2026*. The congress invites geoscientists from the Carpathian-Balkan realm and beyond to share fundamental and applied research, strengthen cross-border collaboration, and explore the geology of Transylvania and surrounding regions.

CBGA 2026 is the 4th Romanian edition of the CBGA Congress, following Romanian meetings held in Bucharest in 1927, 1961, and 1981. After almost half a century, Romania is hosting the congress again, with Babeş–Bolyai University supported by the Romanian Academy and partner institutions.

The CBGA is a non-governmental, international, scientific, non-political and non-profit union of geoscientists working in the Carpathian-Balkan region and surrounding areas. The Association is affiliated to the International Union of Geological Sciences as a regional organization.

Its aims are to promote collaborative cross-border geological research, training and specialization across all fields of geosciences and related environmental disciplines. CBGA organizes congresses, supports Working Groups, stimulates discussion on key geological topics, and publishes scientific materials through congress volumes, maps, monographs and its official journals.

RENEWBALKAN 2026

We are pleased to inform you that the Second International Conference RENEWBALKAN 2026, dedicated to renewable energy sources, geothermal energy, geosciences, and sustainable development, will be held from *November 5 to 7, 2026, in Struga, North Macedonia*.

Following the successful first edition, the RENEWBALKAN conference continues to position itself as an important regional platform bringing together:

- the academic community
- industry
- policymakers
- young researchers

The main goal of the conference is to encourage the exchange of knowledge, experience, and innovative solutions in the fields of:

- geology and geophysics
- mining and environment
- renewable energy sources
- geothermal energy
- energy transition in the Balkan region

Within the framework of the conference, the following will be organized:

- plenary lectures by distinguished experts
- scientific and professional sessions
- a student session
- panel discussions with representatives from industry and institutions

Special emphasis will be placed on the involvement of young researchers and students, whose participation will be supported and encouraged through dedicated sessions and presentation opportunities.

More information regarding registration, the call for papers, and the program will be announced soon.

We invite you to be part of RENEWBALKAN 2026 and to jointly contribute to the development of a sustainable energy future in the region.

Sincerely,
GEO M GROUP

Dr. Aczél Etelka, a Magyar Geofizikusok Egyesületének alapító és tiszteleti tagja 1933 – 2026

Aczél Etelka 1933-ban Budapesten született. 1955-ben okleveles geofizikusként szerzett oklevelet az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán, majd 1969-ben ugyanitt természettudományi doktori címet kapott.

Első munkahelye 1955-től 1957-ig a Földmérő és Talajvizsgáló Iroda volt, ahol a Pécsi Uránbánya vízkutatási programján dolgozott. 1957-től 1988-ban történő nyugalomba vonulásáig a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) munkatársa, ahol rögtön az Intézetbe történő belépésének idején zajló Nemzetközi Geofizikai Év (1957–1958) kutatásaiba kapcsolódott be. Árapálykeltő erők regisztrálását végezte, illetve a gravitációs mérésekben vett részt a Dél-afrikán.

1962 a Nemzetközi Nyugodt Nap éve volt, ehhez kapcsolódóan a következő években földmágneses kutatásokon dolgozott. A földmágneses tér abszolút értékének meghatározását végezték a Tihanyi Geofizikai Observatóriumban, emellett az országos földmágneses alaphálózat és normál térképek szerkesztése (1964–1965), a Tihanyi Geofizikai Observatórium évkönyveinek összeállítása (1969–1978); a földmágneses tér évszázados változásának vizsgálata is folyt, amelyben Aczél Etelka a permanens mágneses tér vizsgálatával foglalkozó nemzetközi munkacsoport magyar elnökeként vett részt (1966–1978).

Aktív életének második szakaszában, 1979-től az ELGI kiadványszerkesztésében, a *Geofizikai Közlemények* és az *ELGI Évi Jelentéseinek* kiadásában vesz részt. 1988-ban vonul nyugalomba.



Dr. Aczél Etelka
1933 – 2026

Szakmai munkássága során közel félszáz tudományos publikációja jelent meg magyar és nemzetközi folyóiratokban, valamint számos előadást tartott magyar vagy idegen nyelven, hazai és nemzetközi konferenciákon.

1989-től 1991-ig szakértőként a Központi Földtani Hivatal (KFH) Oktatási Bizottságának szervezőtitkára. 1992-től 2004-ig „A magyar geofizikai kutatás története” című cikksorozat társszerkesztőjeként a *Magyar Geofizika* szerkesztési munkáiban vesz részt.

A Magyar Geofizikusok Egyesületének (MGE) alapító tagja. 1967-től 1974-ig az MGE Általános Geofizikai Szakosztályának titkára, 1974-től 1981-ig pedig az elnöke, valamint 1967-től 1989-ig az MGE Országos Elnökségének tagja. 1996-tól 2008-ig a *Magyar Geofizika* című folyóirat szerkesztőbizottsági tagja.

– 2002-ben A Magyar Geofizikusok Egyesületének tiszteleti tagjává választják,

- 1990-től 2008-ig az MGE Szenior Bizottságának elnöke,
- 1990-től 2013-ig a Magyar Geofizikusokért Alapítvány kuratóriumának tagja.

Dr. Aczél Etelka szakmai munkásságát a következő kitüntetésekkel ismerték el:

- 1965: a KFH „Földtani Kutatás kiváló dolgozója” kitüntetése
- 1981: a Minisztertanács „Kiváló munkáért” kitüntetése
- 1981: az MGE „Renner János emlékérmé”
- 1999: az ELGI „Pro Geophysica emlékérmé”

Kedves Eti, hosszú és eredményes munkás életed után nyugodj békében!

A Magyar Geofizika Szerkesztőbizottsága

George Sideris, a Balkán Geofizikai Társulat alapítója

Prof. Dr. George Apostolopoulos görög kollégától kaptuk a hírt május 5-én, hogy elhunyt George Sideris, a geofizika athéni egyetemi tanszékvezető tanára, a Balkán Geofizikai Társulat alapítója.

Szerkesztőség

“Dear Colleagues,

It is with great sadness that I inform you that last Sunday we lost Giorgos Sideris. The funeral will take place next Friday.

George, together with other colleagues, set up the Balkan Union with great effort in the difficult Balkan environment at that time.

There are many things that I could remember since I was young PhD student when he was director of Geophysical Department of IGME helping the youngsters always finding a compromise when there were problems between colleagues, as a President of Hellenic Geophysical Union.

I experienced his efforts in all activities from the beginning.

* * *

Regarding BGS two examples.

At the first Congress, the difficult Greek–Turkish political relations did not play a role with George and Ahmet.

At the first Congress, George went by bus to the border to pick up the Albanian colleagues, trying to solve many bureaucratic problems.

George with his character, together with the leaders from all Balkan countries, created a very friendly environment between us, which of course continued.

The relationship between BGS and EAGE was initially supported by George, who believed in this relationship.

* * *

I think we will not forget him and we are obliged to continue to support the efforts for BGS.

All the best
George”

2025-ben hunyt el a soproni egykori Geofizikai Kutatólaboratórium (a későbbi MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, több átalakulást követően ma HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet) két kiemelkedő geofizikusa. Mindketten a földi geo-elektromágnesség nemzetközileg elismert kutatói, az MTA Széchenyi-díjas tagjai, szakmai szervezetek vezető egyéniségei és kitüntetettjei, valamint helyi közéleti példaképek (soproni díszpolgárok) voltak.



Verő József

(Sopron, 1933 – Pilisvörösvár, 2025)

A nagyeceni geofizikai obszervatóriumban kialakította a ma már egyedülállóan hosszú pulzációs adatsor mérési rendszerét. Kimutatta a geomágneses pulzációknak a bolygóközi tér egyes fizikai paramétereivel való kapcsolatát, bizonyítva a jeleket létrehozó hullámok földi magnetoszférán kívüli eredetét. Ő a számítógépes MT-adatfeldolgozás megalkotója.

Ádám Antal

(Szekszárd, 1929 – Sopron, 2025)

A felszín alatti térség mélyszerkezetét az elektromos fajlagos vezetőképesség térbeli eloszlása révén: a tellurika és a magnetotellurika (MT) módszerével kutatta, idehaza és külföldön is. Műszer- és módszerfejlesztő is volt. A dunántúli vezetőképesség-anomália és a Pannon-medence alatti litoszféra sajátosságaira vonatkozó eredményeit világszerte ismertté tette.



MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETE

1143 Budapest, Stefánia út 14.; Tel./Fax: (06) 30-811-8819

E-mail: geofizikusok@gmail.com; Honlap: www.mageofegy.hu